**Analiza postojeće literature fiziologije biljaka tijekom procesa sušenja**

**Članak 1:** Dinko Oletic, Sabine Rosner, Monika Zovko, Vedran Bilas, Time-frequency features of grapevine’s xylem acoustic emissions for detection of drought stress, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 178, 2020, 105797, ISSN 0168-1699,

**Link:** <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105797>

**Zaključci:**

1. Frekvencijska analiza je identificirala karakteristične tipove akustičnih emisija
2. Ekvilizacija senzorske karakteristike omogućila je širokopojasnu analizu AE s malim piezo elektricima
3. Vrijednosti frekvencije vrhova emisija s jednim vrhom u amplitudnom spektru grupiraju se oko 200 kHz, dok emisija s više vrhova u amplitudnom spektru grupiraju se između 200 i 600 kHz
4. Analiza emisija otkrila je 3 grupe: emisije s jednim, više i nijednim vrhom
5. Osjetljivost, selektivnost i ponovljivost provjerena na 4 skupa podataka
6. Izabrani skup značajki može detektirati sušni stres koji korespondira vodenom potencijalu -0.7 do -1.2 MPa

**Sadržaj:**

Kod pametnih sustava za navodnjavanje potrebno je odrediti pragove navodnjavanja.

Kod slučajeva kada je potrebno izrazito precizno navodnjavanje (kršni tereni, oskudica vode) određivanje pragova navodnjavanja postotkom vode ili vodenim potencijalom u tlu je neefikasno. [1]

Zbog toga potrebne su nove tehnike ranog određivanja vodenog stresa kod biljaka.

Uvjeti vodenog stresa kod biljaka uzrokuju povećanje učestalosti evapotransipiracije čime voda unutar ksilema biljke je pod velikom napetosti i tlakom. Time biljka dolazi u stanje podložno kavitaciji što može uzrokovati reverzibilnu embolizaciju koja uzrokuje prekid u stupcima vode unutar ksilema. Ako embolizacija postaje trajna uzrokovati će gubitak hidrauličke vodljivosti što može uzrokovati smrti biljke.

I dalje nedostaju dovoljno precizni alati za terensko navodnjavanje biljaka.

Postojeće in-vivo (analiza unutar biljke) metode za određivanje pada hidrauličke vodljivosti uzrokovane embolizacijom su:

1. NMR – nuklearna magnetska rezonanca
2. Rendgenska kompjuterizirana tomografija (µ-CT) – riskira oštećenje stanica
3. Destruktivna mjerenja hidrauličke vodljivosti

Indirektno mjerenje hidrauličke vodljivosti postiže se mjerenjem vodenog potencijala ksilema pomoću krivulja ranjivosti (VC) definiranih na temelju sorte ili vrste biljaka nad kojom se vrše mjerenja.

Alati za mjerenja vodenog potencijala:

1. Scholander tlačna komora
2. Psihorometri (mjere vlažnost zraka) za tlak pare stabljike – ne invazivno i ovisno o temperaturi okoline

Navedene metode nisu primjenjive za proizvodnju velikih razmjera na terenu.

In-situ -> mjerenja nad organizmom u prirodnoj okolini i stanju, u divljini

Neinvazivan metoda in-situ promatranja embolizacije ksilema , time i gubitka hidrauličke vodljivosti , moguća je analizom akustičnih emisija biljaka. Akustične emisije nastaju kada prilikom otpuštanja napetosti uzrokovane embolizacijom u protoku vode vodovima (kanalima) ksilema.

Uzroci akustičnih emisija kod biljaka:

1. Pucanje ksilemskih kavitacijskih mjehurića koji se javljaju uglavnom nakon zatvaranja stomata (pore na epidermi biljke koja služi i regulira brzinu razmjenu plinova biljke i okoline )- dugo su se smatrali dominantnim fiziološkim akustičnim izvorima.
2. Skupljanje stanične stijenke
3. Stvaranje (formiranje) pukotina
4. Kapilarnost slobodne vode (Hainesovi skokovi)
5. Skupljanje tkiva kore
6. Nukleacija (stvaranje najmanjih kristalnih jezgara čiji je daljnji rast termodinamički potican) i širenje leda u ksilemu koji se smrzava

Navedeni uzroci proizvode mehaničke valove propagirane kroz tkivo biljke kao medij.

Zbog toga piezo električni senzori su postavljeni na površinu stabljike kako bih snimili sporadične akustične emisije koje tipično nastaju u frekvencijskom pojasu između 100 kHz i 1 MHz.

Pokazana je korelacija između nastanka AE emisija i smanjenja hidrauličke vodljivosti biljke te vodenog potencijala biljke (Mapiranje AE na VC). Isto tako AE je uspoređen s direktnom vizualizacijom embolizma metodom µ-CT.

Milburn i Johnson su prvi koji su otkrili emitiranje akustičnih emisija iz biljaka u stanju dehidracije te povezali navedene signale s formiranjem embolizama unutar ksilema biljke. [0]

Izazovi kako bi AE metoda bila deployable i služila preciznom navodnjavanju:

1. AE senzori – direktna usporedba uskopojasnih nisko frekvencijskih rezonatnih senzora s širokopojansim visoko frekvencijskim

* Isto tako zanimljiva je usporedba s minijaturnim visoko frekvencijskom rezonatnim pizeo elektricima za mjerenja na manjim stabljikama i granama.

1. U prijašnjim radovima postignuta je diferenciranje emisija po akustičnim izvora (kavitacija) na temelju frekvencijske i amplitudne analize emisija. [1-6] Isto tako pokazano je kako emisije uzrokovane kavitacijom se pojavljuju u frekvencijskom pojasu od 100 do 200 kHz. [7,8]

Međutim u navedenim radovima nije napravljeno ispravljanje akviziranih akustičnih emisija pomoću odziva senzorske karakteristike (ekvilizacija) pa frekvencijski spektar je možda krivi.

Isto tako kako i široko pojasni senzori uvode šum još je bitnija ekvilizacija.

1. Potrebno je izabrati značajke akustičnih emisija koje će poslužiti kao rani, specifični i ponovljivi simptomi sušnog stresa. Kako vrijednosti konvencijalnih značajki kao kumulativni broj AE emisija, broj emisija po satu, amplitude ili energije AE emisija se razlikuju od eksperimenta do eksperimenta zbog razlike od udaljenosti izvora emisija do senzora, akustičnim svojstvima fiziološkog tkiva, tipa senzora, spajanja, osjetljivost akvizicijskog lanca itd. Ovo je motiviralo odabir značajki neovisnih na magnitude kao što su nagib i ekstremne točke funkcije broja AE po satu AE, distribucija energije u određenim frekvencijskim pojasevima. I dalje analiza frekvencijskih značajki ostaje inkokluzivna.
2. Rijetko se izvode eksperimenti na živim biljkama zbog logističkih faktora i potrebne duljine eksperimenta. Stoga se najčešće provodi samo prisilno/inducirano stolno sušenje odsječenih grana, riskirajući da embolija otvorene žile širi artefakte u vrstama dugih krvnih žila. Stoga je eksperimentalna usporedba između AE odgovora dobivenih na odsječenim granama i na živoj biljci potrebna.

Napravljena je usporedba tri različita piezoelektrična senzora s komplementarnim karakteristikama.

1. Rezonatni senzor Vallen VS150-M – za usporedbu s prijašnjim istraživanjima, s pretpostavkom frekvencijskog pojasa emisija uzrokovanih kavitacijom od 100 – 200 KHz.

Rezonatni vrh ima na 150 kHz. Glavni nedostaci su velike dimenzije i neprikladnost za širokopojasnu analizu signala zbog propusnog pojasa od 100 do 500 kHz te slijepih točaka u određenim frekvencijskim pojasevima.

1. Za detaljnu frekvencijsku analizu široko pojasnih frekvencijskih karakteristika iskorišten je senzor Fuji Ceramics AE1045S. Ima glatki propusni pojas (passband) od 100 do 1500 KHz bez slijepih točaka. Veliki nedostatak je što je dosta velik u usporedbi s biljkom.
2. Senzor Vallen VS600-Z1 je malih dimenzija te ima šriokopojasne frekevencijski odziv. Rezonatni vrh je lociran na 600 kHz. CIlje je bio ekvilizirati te iskoristiti ga u pojasu 100-500 kHz kao obični mikrofoni i akceleremetri.

Akvizicija signala je sastavljen od piezoelektričnog senzora, strujnog kruga za prilagodbu analognog signala, ADC-a i laptopa koji pokreće Matlab skriptu. Prilagodba analognog signala je odrađena Vallen pojačalom AEP3N. Gain je postavljen na 40 dB (oko 100 V) te granične frekvencije propusnog pojasa postavljene na 100 do 1000 kHz. Pojačani signal je digitaliziran pomoću National Instruments USB-DAQ 6366 ADC-a s frekvencijskom uzorkovanja od 2000 kHz te 16 bitnom rezolucijom (305 µV po bitu). Akviziciju i spremanje kontrolira Matlab skripta.

Isto tako paraleleno su odrađena mjerenja tla i zraka kao relativni volumenski sadržaj vode (VWC %) , temperatura tla, temperatura zraka , relativna vlažnost zraka. Mjerenja vodenog potencijala lista te relativan gubitak mase čitavog uzorka uzrokovan transpiracijom kroz tkivo biljke i evaporacijom tla. Navedena mjerenja su uspoređena s mjerenjima AE.

Ukupno je izvedeno 12 eksperimenta u 3 grupe:

1. Prva 3 eksperimenta , svaki s drukčijim senzorom, su bila stolno sušenje odsječenih grana

* Svi zaključci o grupiranju na temelju peakova i izabran senzor VS600-Z1 za daljnje ekesperimente

1. 4. eksperiment (samo jedan zbog duljine) (VS600-Z1)- Prirodno sušenje biljke u laboratorijskim uvjetima
2. 5.-12. eksperimenti (VS600-Z1)- Prirodno sušenje biljke u klimatskoj komori radi ubrzana-ja sušenja. Nakon perioda sušenja radio se oporavak normalnog rada biljke zalijevanjem. Testirana dugoročna ponovljivost eksperimenta tako da je biljka dehidrirana te se oporavlja do početnih uvijet (4 mjeseca) gdje je opet napravljen isti eksperiment dehidracije.

Opis granica amplituda i duracija.

Opis frekvencijskih pojasa nakupljanja frekvencijskih vrhova nakon ekvilizacije.

Grupiranje na temelju broja peakova i analiza za svaki dataset.

Dokazano je kako je neispravno oslanjati se samo na širinu frekvencijskog pojasa i glatkoću propusnog pojas piezeelektričnih senzora već je potrebno ekviliziranti dobiveni signal. Postupak korišten u ovom članku je korištenje minijaturnih visoko frekventnog senzora za široko pojasnu frekevencijsku analizu. Korisno kod primjene na terenu za manje grane na koje najviše utječe suša.

Dokazano da senzor AE1045S (VS150-M) ima slijepe točke u određenim frekevencijskim pojasevima pa nije prikladan za frekvencijsku analizu AE.

Senzor VS600-Z1 primjenjiv za ananlizu frekevencijskih pojasa (100-550 kHz) dosta nižih od njegove rezonantne frekvencije.

Faze rada biljke:

1. Dobro zalijevana biljka – periodične dnevne emisije koje čine (do 400 h)
   1. broadband emisije – 100 -200 kHz median freq
   2. multipeak emisije - 200-300 kHz i 800-900 kHz
2. Početak dehidracije – pojačana stopa AE po satu (od 400 do 450 h)
3. Zatvaranje stoma – privremeno smanjenje stop AE emisija po satu (od 450 do 500 h)
4. Faza dehidracije – eksponencijalni rast stope AE po satu (500 – 650 h)
   1. Gubitak periodičnih dnevnih emisija
   2. Dolazak emisija s jednim peakom oko 200 kHz
   3. Dolazak mutlipeak emisija oko 200 – 600 kHz
   4. Povećana vjerojatnost pojave emisija niske amplitude, visoko frekvencije do 850 kHz
      1. Slično je opisano u [9] , to se pripisuje promjeni brzine zvuka u vezi sa sadržajem vlage stabljike i tkiva [10]

Predložene značajke uspjevaju otkriti dehidraciju biljke tijekom -0.7 i -1.2 MPa vodenog potencijala lista, prije vizualnih znakova vodenog stresa kod biljaka.

Kratkotrajna ponovljivost eksperimenta je moguća kada drvo se oporavlja zalijevanjem, a tijekom faze dehodracije drvo nije dehodrirano ispod saturacije vlakana. Definirani je transpiracijski oporavni prag vodenog potencijala od -2.51 MPa u [11] ,dok u ovom radu je vodeni potencijal lista uvijek držan ispod -1.5 MPa.

Dugoročna ponovljivost eksperimenta je dokazana kako je eksperiment proveden u drukčijim godišnjim dobima na istoj biljci s slični rezultatima.

Na kraju kaže kako će budući rad uključivat istraživanje prikladnih algoritama automatiziranog grupiranja koji nadopunjuju predloženi skup značajki,i implementaciju ugrađenog AE hardverskog prototipa male snage.

Opis rada firmware i hardware SENSIRRIKA: [IEEE Xplore Full-Text PDF:](https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9628579)

Passband – frekvencijski pojas u kojem su signali provedeni kroz filtar bez atenuacije

Piezeelektrični senzori – mehanički val na ulazu te oni ga pretvaraju u napon na izlazu

[0] Millburn JA, Johnson RP. The conduction of sap: II. Detection of vibrations produced by sap cavitation in Ricinus xylem. Planta. 1966;69:43–52.

**Link:** [Sci-Hub | The conduction of sap. Planta, 69(1), 43–52 | 10.1007/BF00380209](https://sci-hub.se/10.1007/BF00380209)

[1] Vergeynst, L., Sause, M.G., Steppe, K., 2014. Acoustic emission signal detection in drought-stressed trees: beyond counting hits. 31st EWGAE Conference.

**Link:** [140630\_Fr\_3\_A\_4\_Vergeynst (ugent.be)](https://biblio.ugent.be/publication/5799025/file/5799026)

[2] Vergeynst, L.L., Sause, M.G.R., Hamstad, M.A., Steppe, K., 2015. Deciphering acoustic emission signals in drought stressed branches: the missing link between source and sensor. Front. Plant Sci. 6.

**Link:** [Sci-Hub | Deciphering acoustic emission signals in drought stressed branches: the missing link between source and sensor. Frontiers in Plant Science, 6 | 10.3389/fpls.2015.00494](https://sci-hub.se/10.3389/fpls.2015.00494/full)

[3] Vergeynst, L.L., Sause, M.G.R., De Baerdemaeker, N.J.F., De Roo, L., Steppe, K., 2016. Clustering reveals cavitation-related acoustic emission signals from dehydrating branches. Tree Physiol. 36, 786–796.

**Link:** [Clustering reveals cavitation-related acoustic emission signals from dehydrating branches (silverchair.com)](https://watermark.silverchair.com/tpw023.pdf?token=AQECAHi208BE49Ooan9kkhW_Ercy7Dm3ZL_9Cf3qfKAc485ysgAAAs0wggLJBgkqhkiG9w0BBwagggK6MIICtgIBADCCAq8GCSqGSIb3DQEHATAeBglghkgBZQMEAS4wEQQMwSGGI_15p2l_A1buAgEQgIICgB96DfXTV7PZfRubQ1aWnvSyz58ViSVUdzUdicPHvRp5w_jkeNVFmtisvIN6meUKpCEz3lYGH29k9v3NyoK64vSAOYahCtBHuYCU_JnL-AyO8YkKaaxXTbdM3Hbd_ZFkpXZjtA_reD0TGqtfGlBvV1HKpntgyF1un-TUqSo31PK65d5SsBlXMLl-L5YkMHa1XDr9cYwduSsH4WYurtjELO-7TEEcDuuq-ruAh7MLdLbEIYAor5gys7h9969IkwcI_7Y21ey-iMGswIdUyRb7x_VcPD8TVg1CN-QhqSjwtsJeTU3DWLrKz7Bumt-DupKyrSW00JZtU0-5EI7tISEMPZdnNo_KLg2q24qFD7fz3CgaYFzS_ykJ7dsPO_v25Od6U7ntdxqbg8kq1rm_lzq0bXd0BnjOVsIXC_PWr13CYxZ_TMD0JGEb5tFmJYteyulOzvGq3iPUCcCn1NjWH8-SLwFrvKHzhiREWsJL3_M7vdLu9WXTPX17nAGE0tGMltehGT2SZi2G_iNZDmNsLJTdAPzVKAZZurysMJEG2DRCuCVno8_A0xgmzO6ltwU2tynL40APBwrKJQDuOHmdsWFHeeC3wpSqcuzQnfte2joyp6x0tPKgtirD4NXeom5Q7_b3onzzfetCyX--GdQjgfF1HUkJ6Xz6xSaDXIv3knhZC3g39LPtJz-XQK8h9TlMehAKCpeAFv0pagwdWtzdj5LGNYAJXRG1i2K1ebOGOmkU5vnUAV5I0xtIwJez4LuxJpsiOBGQtd-RAhWJYlmj1HqNACKm7UKUr68rQi1r3X2fD2mewUINlZRolKaLMGlQU6qdYqT87D2D94RiiOpPQd_4EG0)

[4] Rosner, S., 2004. Acoustic detection of cavitation events in water conducting elements of Norway spruce sapwood. J. Acoust. Emission 22, 110–118.

**Link:** [Acoustic Detection of Cavitation Events in Water Conducting Elements of Norway Spruce Sapwood (ndt.net)](https://www.ndt.net/article/jae/papers/22-110.pdf)

[5] Laschimke, R., Burger, M., Vallen, H., 2006. Acoustic emission analysis and experiments with physical model systems reveal a peculiar nature of the xylem tension. J. Plant Physiol. 163, 996–1007.

**Link:** [Sci-Hub | Acoustic emission analysis and experiments with physical model systems reveal a peculiar nature of the xylem tension. Journal of Plant Physiology, 163(10), 996–1007 | 10.1016/j.jplph.2006.05.004](https://sci-hub.se/10.1016/j.jplph.2006.05.004)

[6] Kasuga, J., Charrier, G., Uemura, M., Ameglio, T., 2015. Characteristics of ultrasonic acoustic emissions from walnut branches during freeze–thaw-induced embolism formation. J. Exp. Bot. 66 (7), 1965–1975.

**Link:** [Sci-Hub | Characteristics of ultrasonic acoustic emissions from walnut branches during freeze–thaw-induced embolism formation. Journal of Experimental Botany, 66(7), 1965–1975 | 10.1093/jxb/eru543](https://sci-hub.se/10.1093/jxb/eru543)

[7] De Baerdemaeker, N.J., Stock, M., Van den Bulcke, J., De Baets, B., Van Hoorebeke, L., Steppe, K., 2019. X-ray microtomography and linear discriminant analysis enable detection of embolism-related acoustic emissions. Plant Methods 15 (153), 1–18.

**Početni članak iz kojeg smo uzeli značajke! Značajke zapravo unutar AEwin sustava** [Microsoft Word - Cover PCI-2\_r3.doc (cuni.cz)](https://material.karlov.mff.cuni.cz/people/mathis/Navody/PCI2.pdf).

**Link:** [Sci-Hub | X-ray microtomography and linear discriminant analysis enable detection of embolism-related acoustic emissions. Plant Methods, 15(1) | 10.1186/s13007-019-0543-4](https://sci-hub.se/10.1186/s13007-019-0543-4)

[8] De Roo, L., Vergeynst, L.L., De Baerdemaeker, N.J.F., Steppe, K., 2016. Acoustic emissions to measure drought-induced cavitation in plants. Appl. Sci. 6, 71.

**Link:** [Sci-Hub | Acoustic Emissions to Measure Drought-Induced Cavitation in Plants. Applied Sciences, 6(3), 71 | 10.3390/app6030071](https://sci-hub.se/10.3390/app6030071)

[9] Rosner, S., 2007. Characteristics of acoustic emissions from dehydrating wood related to shrinkage processes. J. Acoust. Emission 25, 149–156.

**Link:** [Characteristics Ofacoustic Emissions from Dehydrating Wood Related to Shrinkage Processes (ndt.net)](https://www.ndt.net/article/jae/papers/25-149.pdf)

[10] Kawamoto, S., Williams, R.S., 2002. Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites: A Review. United States Department of Agriculture.

**Link:** [Acoustic Emission and Acousto-ultrasonic Techniques for Wood and Wood-based ... - Sumire Kawamoto - Google Knjige](https://books.google.hr/books?hl=hr&lr=&id=8q05D0nADC0C&oi=fnd&pg=PA1&ots=fySoYy2fdX&sig=-N-p8mbrqx1XyFhzcOA7g9FAWHg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

[11] Charrier, G., Delzon, S., Domec, J.C., Zhang, L., Delmas, C., Merlin, I., Corso, D., King, A., Ojeda, H., Ollat, N., Prieto, J.A., Scholach, T., Skinner, P., van Leeuwen, C., Gambetta, G., 2018. Drought will not leave your glass empty: Low risk of hydraulic failure revealed by long-term

**Link:** [Drought will not leave your glass empty: Low risk of hydraulic failure revealed by long-term drought observations in world’s top wine regions (science.org)](https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aao6969)

**Članak 2:** L. Vergeynst, “Investigation and application of the acoustic emission technique to measure drought-induced cavitation in woody plants,” Ghent University. Faculty of Bioscience Engineering, Ghent, Belgium, 2015.

**Link:** [**http://hdl.handle.net/1854/LU-6925217**](http://hdl.handle.net/1854/LU-6925217)

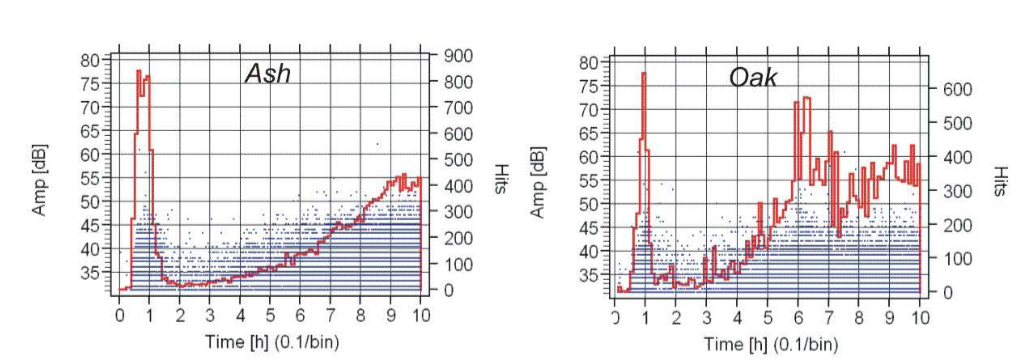
Zaključci:

**Članak 3:** Rosner, Sabine. (2012). Acoustic Emission Related to Drought Stress Response of Four Deciduous Broad-Leaved Woody Species. Journal of Acoustic Emission. 30. 11-20.

**Link:** [(PDF) Acoustic Emission Related to Drought Stress Response of Four Deciduous Broad-Leaved Woody Species (researchgate.net)](https://www.researchgate.net/publication/272292514_Acoustic_Emission_Related_to_Drought_Stress_Response_of_Four_Deciduous_Broad-Leaved_Woody_Species)

Zaključci:

1. Ovisno o vrsti biljke distribucija i stopa AE je različita. Određene vrste ukazuju na povećanje stope AE prije totalnog gubitka hidrauličke vodljivosti, dok kod drugih vrsta učestalost AE se smanjuje.
2. U određenim vrstama emisije nastale tijekom prvog naglog porasta stope AE mogu se grupirati po amplitudu, dok kod drugih vrsta distribucija amplituda ostaje slična tijekom čitavog eksperimenta. Slika dolje prikazuje navedeno.



1. Veliki pad vodnog potencijala (-4 do -5 MPa) povezan je s naglim porastom stope AE emisija.
2. Pad stope AE emisija nakon prijašnjeg naglog porasta znači da si biljke reagirale na vodeni stres te zatvorili stomate na listovima kako bi spriječili evaporaciju i smanjili tenzije.
3. U određenim vrstama porast stope AE je detektiran i nakon potpunog zatvaranja stomata.

**Članak 4:** Lidewei L. Vergeynst, Markus G.R. Sause, Niels J.F. De Baerdemaeker, Linus De Roo, Kathy Steppe, Clustering reveals cavitation-related acoustic emission signals from dehydrating branches, Tree Physiology, Volume 36, Issue 6, June 2016, Pages 786–796,

**Link:** <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw023>

Zaključci:

1. Pomoću AE metode moguće je konstruirati krivulje ranjivosti (VC) i pratiti gubitak hidrauličke provodljivosti biljke.
2. Navodi kako nova istraživanja dokazuju da stvaranje plinovitih embolija u ksilemu pod tenzijom nije jedini uzrok AE.
3. Analizom frekvencijskog sadržaja AE dobivenih širokopojasnim senzorom uspjeli su grupirati AE u 3 grupe. Koristili su automatsko clusteriranje pomoću kmeans algoritma. Analizom značajki i obrasce aktivnosti AE uspjeli su izdvojiti AE uzrokovane kavitacijom na temelju frekvencijskog sadržaja. AE s visokim frekvencijskom sadržajem u pojasu između 100 i 200 kHz klasificirani su na uzrokovane kavitacijom.
4. Uspoređuju faze eksperimenta sušenja s AE grupacijama kako bi došli do zaključka.
5. Preprocessing:
   1. Filtrirane frekvencije ispod 50 kHz
   2. Izabrano 11 značajki jer je potrebno što više informacija:
      1. Amplitude (dB)
      2. Rise Angle (rad)
      3. Rise time (µs)
      4. Apsolutna energija (aJ)
      5. Peak frequency (PF) (Hz)
      6. Frequency centroid (FC) (Hz)
      7. Weighted PF (WPF) (Hz) – geometrijska srednja vrijednost od PF i FC
      8. Partial power 1 (PP1) (%) – 0-100 kHz
      9. Partial power 2 (PP2) (%) – 100-200 kHz
      10. Partial power 3 (PP3) (%) – 200-400 kHz
      11. Partial power 4 (PP4) (%) – 400-800 kHz
6. Selekcija značajki:
   1. Izabrani podskupovi od 4 do 7 značajki
   2. Uzet slučajan uzorak od 4000 emisija od ukupno 7168
   3. Normalizacija
   4. Kmeans s brojem clustera od 2 do 4
   5. 4 validity indexa: Tou-index, Rousseeuw’s silhouette value, the Pearson’s Gamma statistic and the Davies–Bouldin indeks
   6. Bodovanje rezultat od 1 do 25
   7. Izabran cluster s najviše bodova
7. Uspoređivanje rezultata clusteringa s ostalim mjerenjima biljke:
   1. Konstruiranje AE krivulja ranjivosti (VC)
      1. Krajnje točke krivulje su određene kada je stopa AE nakon vrha najviše pala. Matematički zadana točka može se naći na poziciji gdje je treća derivacija krivulje stope AE u vremenu dosegne lokalni maksimum
      2. Prva derivacija stope AE krivulje je računata na intervalu od 15 min
      3. Druga i treća derivacija stope AE krivulje računata je na intervalu od 12 h
         1. Duži interval je odabran kako bi se eliminirati snažne male fluktuacije prve derivacije i temelji se na vremenskoj skali u kojoj je AE vrhunac dogodio.
         2. Za prijelaznu točku između elastično skupljanje i fazu kavitacije, tražili smo minimum u drugoj derivaciji na krivulju VWC (volumenski vodeni sadržaj) naspram vodnom potencijalu. To je točka kada je hidraulička provodljivosti najviše narasla. Faza elastičnog skupljanja karakterizira nekoliko događaja kavitacije i jaka kontrakcija promjera (Vergeynst et al. 2015a).
8. Pronađeno je distinktivna 2 klastera s podskupom značajki FC, PF, WPF i PP4. Prvi klastera od 2% emisija ima emisije s visokim WPF i PP4, dok drugi klaster emisije imaju velike varijacije u pojasu 100-200 kHz. Nakon toga napravljeno je grupiranje drugog većeg klastera koji se podijelio u 2 pomoću značajki WPF, PF, PP1 i PP2. Bazirano na frekvencijskom sadržaju 3 klastera su labelirana nisko, srednje i visoko frekvencijski klasteri. Nisko i srednje frekvencijski klasteri su imali visoki PP1 i PP2, dok visoko frekvencijski klaster je imao visoke PP4, WPF, PF i FC. Srednje frekvencijski klasteri su grupirani u PF značajci oko 200 kHz.
9. Analiza clustera:

Slika na kojoj se prikazuje strijela

Opis je automatski generiran

1. Mapiranje faza širenja stijenke pa kavitacije s custerima:
   1. U kojim fazama je koji cluster bio aktivan i kada pasivan
   2. Nisko frekventni aktivan poslije gubitka 100% hidrauličke aktivnosti
   3. Visoko frekventni aktivan većinom u početnim fazama – sužavanje stijenke
   4. Srednje frekventni aktivan do gubitka 100% hidrauličke aktivnosti – pretpostavljen uzrokovan kavitacijom
   5. Vizualna korelacija dobivena uCT određuje veću korelaciju nisko frekvencijskog klastera s mjehurićima zraka nego srednje frekvencijskog clustera
      1. Vjerojatno zbog preklapanja srednje frek s visoko frek clusterom
2. Definiranje točke gubitak hidrauličke aktivnosti od 100%
   1. Kada AE aktivnost poslije vrhunca padne u nulu tj. lokalni maksimum treće derivacije kumulativnih AE u vremenu
   2. Najveća aktivnost AE je kod najstrmijeg mjesta krivulje – P50
3. Frekevencijske značajke su dokazano dobro clusterirale uzroke AE. s (Sause and Horn 2010)
4. Rana aktivnost visoko frekvencijskog clustera:
   1. Kapilarnost slobodne vode
      1. Kapilarnost vode s trenutno otpušta tijekom početka dehidracije - (Tyree and Zimmermann (2002)) što uzrokuje slijed AE (Tyree and Yang (1990))
      2. Visoko frekvencijske komponente mogu biti uzrokovane ne destruktivnim kapilarnim akcijama slobodne vode – (Ogino et al. (1986), Rosner (2012))
   2. Brze kontrakcije kore tijekom početnog elastičnog smanjenja
      1. Kora sadrži mrtve stanice, određene mrtve stanice emitiraju AE tijekom dehidracije
      2. Tip visoko frekventnih signala s relativno visokom amplitudom i malim rise time-om je povezan s pukotinama na površini u suhom hrastu – signal je nastao vrlo brzim mikrofrakturama na površini ili između stanične stijenke – nije baš dokazano, potrebno dodatna istraživanja
      3. Kako se visoko frekvencijekse AE smanjuju do minimuma kod početka faze kavitacije to može biti uzrokom kraja sužavanja kore
5. Nisko frekvencijski cluster
   1. Makro pukotine imaju visoku energiju, visoki rise-time i niske frekvencije
   2. Nakon završetka faze kavitacije stvaraju se velike pukotine što objašnjava nastavak AE nisko frekvencijskog clustera
   3. Hainesovi skokovi
      1. Slobodna voda koja je još ostala u biljci a nije dio njezinog toka može biti pokrenuta utjecajem viskoznosti, kapilarnosti ili gravitacije
      2. kretanje iscjeđenja (denaže) kroz porozni medij (materijal s porama) je karakterizirana brzim pomacima meniskusa (zakrivljenost na površini toka) nazvanim haines jumps
      3. Ovakve brze promjene zraka i vode na površini su povezane s AE na frekvencijama 50-250 kHz, 10-30 kHz i ispod 3.75 kHz te mogu se dogoditi kada meniskus prolazi kroz krajnji zid žile ksilema.
   4. Isto tako tijekom kavitacijske faze, kretanje vode koja nije povezana zbog mjehurića zraka može uzrokovati nisko frekvencijske AE – objašnjava sličnu distribuciju nisko i srednje frekvencijskog clustera
6. Srednje frekvencijski cluster
   1. Veće frekevencije od niskog clustera zbog toga što formacija mjehurića zraka pod pritiskom uključuje veći pad pritiska od drenaže slobodne vode što znači brže kretnje vode te više frekvencije AE
   2. Puknuće mjehurića uzrokuje AE bez uzrokovana embolizacije
7. Objašenjenje sličnosti niskog i srednjeg clustera:
   1. Zbog propagacije vala od izvora do površine , medij stabiljke više atenuira signale više frekvencije nego signale niže frekvencije pa određeni signali srednjeg clustera su pali u niži cluster
   2. Aktivnosti nižeg clustera u fazi sužavanja stijenke vjerojatno je uzrokovan AE emisijama visoke frekvencije koje su dosta udaljene od senzora te zbog toga atenuirane u nisko frekvencijski pojas

**Članak 5:** De Baerdemaeker, N.J.F., Stock, M., Van den Bulcke, J. *et al.* X-ray microtomography and linear discriminant analysis enable detection of embolism-related acoustic emissions. *Plant Methods* **15,**153 (2019).

**Link:** [Sci-Hub | X-ray microtomography and linear discriminant analysis enable detection of embolism-related acoustic emissions. Plant Methods, 15(1) | 10.1186/s13007-019-0543-4](https://sci-hub.se/10.1186/s13007-019-0543-4)

Zaključci:

1. Strojno učenje je korišteno za vizualno povezivanje kavitacija prikazanih uCT-om i AE emisija dobivenih s 2 senzora.
2. Izvedena je LDA (linearno diskriminativna analiza) značajki: amplitude, counts from, duration from peak, signal strength, absolute energy and partial power in the range 100–200 kHz
   1. Ove značajke su prije dokazane za identificirane kavitacija
      1. UAE energija [energy]
      2. UAE PP2 [PP2]
      3. UAE peak amp,duracija, relativna eng [others]
   2. Visoke vrijednosti ovih značajki su uzrokovane AE kavitacijom?
3. Formirane su krivulje ranjivosti iz AE koje su povezane s embolizmima – broj kumulativnih emisija kroz vodni potencijal biljke u tom trenutku
   1. Za VC broj cum AE kroz vrijeme za prvu krivulju je interval 10 min, za prvu derivaciju 15 min a za treću dreivaciju 48 h
4. Koristi PCA za selekciju značajki:
   1. Ne nazdzirano učenje se koristi za modeliraje strukture podataka u svrsi identificiranja skrivenih uzoraka u nelabeliranim datasetima bazirano na ulaznim varijablama
   2. Ne nadzirano učenje počinje s istraživačkim procesom kao PCA kako bi se objasnila varijanca podataka.
   3. PCA je odredio pomoću prve 2 principale komponente određeni manji broj outliera koji su uzeti kao mogući uzrok kavitacija jer je uCT odredio manji ili približan broj AE
   4. Smjer outliersa (PC1+) ili prva principalna komponenta je dobro korelirana s ABSENERGY, DURATION, SIG\_STRENGTH, COUNT FROM i AMP te isto tako nevedene značajke su međusobno dobro korelirane pa su izabrane jer se koristi LDA
   5. PP2 je izabran je prije bio bitan, a da se uzme značajka iz frekvencijske domene
5. Korelacijski grafovi su dobri prikazi korelacijski ovisnosti varijabli
6. Histogrami i ROC krivulja (krivulja odnosa specifičnosti i osjetljivosti klasifikatora) mogu se koristiti na koreleogramu i PCA kako bi vizualizirale temeljne distribucije podataka
7. LDA se koristio za supervised učenje te su dobiveni mješoviti rezultati

[energy] Mayr S, Rosner S. Cavitation in dehydrating xylem of Picea abies: energy properties of ultrasonic emissions reflect tracheid dimensions. Tree Physiol. 2011 Jan;31(1):59-67. doi: 10.1093/treephys/tpq099. PMID: 21389002; PMCID: PMC3199436.

[PP2] Vergeynst LL, Sause MG, De Baerdemaeker NJ, De Roo L, Steppe K. Clustering reveals cavitation-related acoustic emission signals from dehydrating branches. Tree Physiol. 2016 Jun;36(6):786-96. doi: 10.1093/treephys/tpw023. Epub 2016 Apr 19. PMID: 27095256.

[others] Rosner S, Klein A, Wimmer R, Karlsson B. Extraction of features from ultrasound acoustic emissions: a tool to assess the hydraulic vulnerability of Norway spruce trunkwood? New Phytol. 2006;171(1):105-16. doi: 10.1111/j.1469-8137.2006.01736.x. PMID: 16771986; PMCID: PMC3196831.