

Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů
Katedra agroekologie a rostlinné produkce**



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Uplatnění hydrogelů při pěstování rostlin pro zemědělské
a nezemědělské účely**

Bakalářská práce

Autor práce: Aleš Bosák

Veřejná správa v zemědělství, rozvoj venkova a krajiny

Vedoucí práce: Ing. Pavel Fuksa, Ph.D.

© 2025 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Uplatnění hydrogelů při pěstování rostlin pro zemědělské a nezemědělské účely" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 27.4.2025

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Pavlu Fuksovi, Ph.D. za jeho ochotu, pomoc a profesionalitu při vedení mé bakalářské práce a za předání rad a zkušeností.

Uplatnění hydrogelů při pěstování rostlin pro zemědělské a nezemědělské účely

Souhrn

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou využití hydrogelů v zemědělství jako účinného nástroje pro zadržování vody, zlepšování půdních vlastností a optimalizaci hnojení zejména v suchých a polosuchých oblastech, kde je dostupnost vody omezená. Úvodní část práce se věnuje globálním výzvám v oblasti hospodaření s vodou, dopadům klimatických změn a nárůstu spotřeby vody v zemědělství. Představuje hydrogely jako inovativní řešení schopné výrazně zlepšit udržitelnost zemědělské produkce tím, že zadržují vodu, snižují její výpar i odtok a zároveň napomáhají efektivnímu využívání živin v půdě.

Práce podrobně popisuje chemické složení hydrogelů, jejich strukturu a mechanismus fungování, přičemž vysvětluje význam hydrofilních polymerních sítí, které umožňují absorpci vody až do několiknásobku jejich hmotnosti. Je zde také rozebrána historie hydrogelů od jejich objevu až po současné moderní aplikace, přičemž zvláštní pozornost je věnována vývoji ekologických variant na bázi přírodních biopolymerů, jako jsou škrob, chitosan, celulóza či kyselá syrovátka. Tyto materiály vykazují nižší ekologickou zátěž a zároveň vysokou efektivitu při aplikaci v půdě.

Část, jež je věnována problematice několika výzkumů této technologie, shrnuje výsledky skleníkových a polních experimentů zaměřených na různé typy plodin (kukuřice, rajče, vinná réva, pšenice, sója aj.) a různé druhy půd. Ukazuje, že použití hydrogelů vede k vyšší klíčivosti semen, intenzivnějšímu růstu, zvětšení výšky rostlin, průměru stonku a biomasy, stejně jako k lepší efektivitě využití vody (WUE). Zejména v písčitých půdách dochází při aplikaci hydrogelu k výraznému prodloužení intervalu dostupnosti vody a snížení frekvence zavlažování.

Práce rovněž analyzuje různé metody syntézy hydrogelů, včetně fyzikálního a chemického zesíťování, suspenzní polymerace nebo fotopolymerace. Srovnává i jejich vlastnosti, náklady a aplikační potenciál. Uvádí konkrétní příklady praktického využití hydrogelů, například v systémech zelených střech, golfových hřišť nebo při zalesňování degradovaných oblastí. Součástí práce je také ekonomická analýza výroby hydrogelů z rýžové slámy, která ukazuje výrazné snížení nákladů oproti importovaným syntetickým polymerům. Závěrečná část práce se věnuje environmentálním rizikům, jako je vznik mikroplastů či hromadění nerozložitelných látek v půdě. Tyto situace mohou být spojeny s nadměrným nebo neodborným použitím syntetických hydrogelů. Důraz je kladen na potřebu vývoje biodegradabilních hydrogelů a na nutnost sledování jejich chování v různých ekosystémech. Výsledky práce potvrzují vysoký potenciál hydrogelů jako nástroje pro udržitelné zemědělství, ale také poukazují na důležitost odpovědného a cíleného využívání těchto materiálů.

Klíčová slova: Hydrogel, zemědělství, retence vody, biopolymer, půdní kondicionér

The use of hydrogels in plant cultivation for agricultural and non-agricultural purposes

Summary

This bachelor thesis deals with the use of hydrogels in agriculture as an effective tool for water retention, improving soil properties and optimizing fertilization, especially in arid and semi-arid areas where water availability is limited. The introductory part of the thesis focuses on the global challenges in water management, the impacts of climate change and the increase in water consumption in agriculture. It introduces hydrogels as innovative solutions capable of significantly improving the sustainability of agricultural production by retaining water, reducing evaporation and runoff, and facilitating the efficient use of soil nutrients. The paper describes in detail the chemical composition of hydrogels, their structure and mechanism of action, explaining the importance of hydrophilic polymer networks that allow water absorption up to several times their weight. It also discusses the history of hydrogels from their discovery to current modern applications, with special attention to the development of eco-friendly variants based on natural biopolymers such as starch, chitosan, cellulose and acid whey. These materials have a lower ecological burden as well as high efficiency when applied in soil.

The section on several researches on this technology summarises the results of greenhouse and field experiments on different types of crops (maize, tomato, vine, wheat, soybean, etc.) and different types of soils. It shows that the use of hydrogels leads to higher seed germination, more intensive growth, increased plant height, stem diameter and biomass, as well as better water use efficiency (WUE). In particular, in sandy soils, the application of hydrogels leads to a significant increase in the water availability interval and a reduction in irrigation frequency.

The work also analyses different methods of synthesis of hydrogels, including physical and chemical crosslinking, suspension polymerization or photopolymerization. It also compares their properties, costs and application potential. It gives concrete examples of practical applications of hydrogels, for example in green roof systems, golf courses or reforestation of degraded areas. The paper also includes an economic analysis of the production of hydrogels from rice straw, showing a significant cost reduction compared to imported synthetic polymers.

The final part of the thesis deals with environmental risks such as the formation of microplastics or the accumulation of non-biodegradable substances in the soil. These situations can be associated with excessive or unprofessional use of synthetic hydrogels. Emphasis is placed on the need to develop biodegradable hydrogels and to monitor their behaviour in different ecosystems. The results of the work confirm the high potential of hydrogels as a tool for sustainable agriculture, but also highlight the importance of responsible and targeted use of these materials.

Keywords: Hydrogel, agriculture, water retention, biopolymer, soil conditioner

Obsah

1. Úvod.....	7
2. Cíl práce.....	8
3. Literární rešerše.....	9
3.1. Problematika hospodaření s vodou v suchých a polosuchých oblastech	9
3.2. Chemické složení a struktura hydrogelů	9
3.3. Historie.....	10
3.4. Fyzické zesíťování	11
3.4.1 Proces zmrazení – rozmrazování	11
3.4.2 Zesíťování hydrofobní interakcí	11
3.4.3 Síťování iontovou interakcí.....	12
3.4.4 Zesíťování vodíkovými vazbami	12
3.5. Polymerace růstu řetězce	12
3.5.1 Polymerace roztoku	12
3.5.2 Suspendní polymerace	13
3.5.3 Fotopolymerace.....	13
3.6. Organické hydrogely	13
3.6.1 Kyselá syrovátka	13
3.6.2 Hydrogely na bázi škrobu	14
3.7. Mechanismus využití hydrogelů jako půdního kondicionéru.....	15
3.7.1 Zadržování vody v půdě	16
3.7.2 Zadržování hnojiv.....	17
3.8. Efektivní zavlažování a aplikace hnojiv	18
3.8.1 Vliv velikosti částic hydrogelu	18
3.8.2 Vliv velikosti částic půdy	19
3.9. Skleníkový nádobový experiment s kukuřicí	20
3.10. Nádobové a polní pokusy	21
3.11. Vliv hydrogelu na růst rajčat	23
3.12. Vliv hydrogelu na pěstování vinné révy	24
3.13. Vliv hydrogelu na zelených střeších	25
3.14. Vliv hydrogelu na golfové hřiště	26
3.15. Potencionální enviromentální rizika	28
3.16. Náklady na výrobu jedné tuny hydrogelu z rýžové slámy	28
4. Závěr	30
Literatura	31

1. Úvod

Voda je jedním z nejdůležitějších přírodních zdrojů, je nenahraditelná a pro život lidí, zvířat i rostlin je zcela nezbytná. Její dostupnost je zásadní nejen pro ekologickou stabilitu, ale i pro rozvoj zemědělství a hospodářství obecně. V posledních desetiletích se v důsledku klimatických změn stále častěji objevují výrazné teplotní výkyvy, snížené množství srážek a dlouhodobá období sucha. Tyto faktory vedou k poklesu dostupnosti vody v půdě, což má za následek omezený příjem vody rostlinami, zvýšené ztráty vody odpařováním i povrchovým odtokem a v konečném důsledku také snížení výnosů plodin. Z důvodu velkého dopadu hydrologického sucha na zemědělskou produkci je vyvolávána potřeba hledání nových technologií, které by umožnily efektivnější hospodaření s vodními zdroji. Jednou z nadějných inovací jsou - hydrogely. Jedná se o specifické materiály tvořené trojrozměrnou sítí polymerů schopných absorbovat a zadržet značné množství vody. Tato jedinečná schopnost je dána přítomností hydrofilních skupin v jejich struktuře a vysokou pórovitostí polymerní sítě. Původ hydrogelů sahá do poloviny 20. století, kdy byly poprvé syntetizovány pro biomedicínské účely, zejména při výrobě kontaktních čoček. Od té doby prošly hydrogely výrazným vývojem a našly široké uplatnění v mnoha oblastech – od medicíny přes farmaceutický průmysl až po zemědělství a environmentální technologie. Současný výzkum se zaměřuje zejména na vývoj biologicky odbouratelných hydrogelů na bázi přírodních polymerů, jako jsou škrob, celulóza nebo chitosan, které minimalizují potenciální negativní dopady na životní prostředí. Díky svým unikátním vlastnostem představují hydrogely perspektivní nástroj pro zvýšení odolnosti zemědělských systémů vůči klimatickým změnám a lepší budoucnost udržitelného hospodaření s vodními zdroji.

2. Cíl práce

Cílem bakalářské práce je vypracovat literární rešerši zaměřenou na představení jednotlivých druhů hydrogelů na syntetické a přírodní bázi a jejich uplatnění v rostlinné produkci, trávnickářství a pro další nezemědělské účely.

3. Literární rešerše

3.1. Problematika hospodaření s vodou v suchých a polosuchých oblastech

V suchých a polosuchých oblastech je výskyt vody kvůli malému množství srážek a zvýšenému odpařování z důvodu vyšších teplot na daleko nižší úrovni než v ostatních lokalitách, proto je v těchto oblastech udržení vody velmi důležitým tématem. Z důvodu velkého sucha dochází k desertifikaci, jedná se o proces degradace půdy způsobený buď přirozenými faktory, nebo lidskou činností, která vede ke snížení produktivity vegetace. Velká část sladké vody je využívána pro zemědělské účely, to tedy činí zemědělství nejcitlivější oblastí na sucho ve světové ekonomice. S rostoucí světovou populací roste i poptávka po potravinách a dalších nezbytnostech, což v blízké době představuje vážnou hrozbu nedostatku potravin v důsledku snížené produkce plodin (Ghobashy et al. 2020). Podle odhadů by do roku 2050 mohlo být nedostatkem vody postiženo asi 6 miliard lidí na celém světě. Pro zmírnění dopadů hydrologického sucha byly vyvinuty různé technologie, jako jsou kapkové zavlažovací systémy či nízkotlaké mikro postřikovače. Tyto metody se však nejčastěji používají u plodin s vysokou agronomickou hodnotou a nejsou vždy ekonomicky výhodné, navíc vyžadují vysoký provozní rozpočet a odborné znalosti pěstitelů. Mezi stále oblíbenější technologii patří hydrogely, které mají schopnost zadržovat velké množství vody (Patra et al. 2022). Tyto materiály zvyšují schopnost půdy udržet vodu, zatímco snižují její odpařování, proces vypařování a odtok vody. Hydrogely také zvyšují příjem vody a její dostupnost pro rostliny, zejména během suchých období tím, že zlepšují provzdušnění, pórovitost, strukturu půdy a biologickou aktivitu. Použití hydrogelů vede k lepšímu růstu plodin, vyšším výnosům a kvalitnější produkci. Jsou také nákladově efektivní, protože šetří vodu, energii i výrobní náklady. Nadměrné používání hydrogelů však může způsobit snížení přísunu kyslíku ke kořenům rostlin a vést k vyššímu zamokření půdy (Pradeep et al. 2023).

3.2. Chemické složení a struktura hydrogelů

Hydrogely představují skupinu hydrofilních, trojrozměrných a zesíťovaných polymerních sítí, které mají jedinečnou schopnost absorbovat velké množství vody nebo biologické tekutiny na 10 až 20násobek své původní hmotnosti (Ahmed et al. 2015). Tato vysoká absorpční kapacita je výsledkem přítomnosti specifických hydrofilních skupin, které umožňují interakci s vodou. Zesíťovaná struktura hydrogelů zajišťuje jejich stabilitu, protože různé chemické vazby a fyzikální interakce brání jejich rozpadu a zachovávají jejich tvar (Linden et al., 2003).

Struktura hydrogelů je tvořena pevnou polymerní sítí nazývanou „síťovina“, která slouží jako nosná matrice, a mezivláknitými prostory vyplněnými vodou či biologickou tekutinou. Právě tato kombinace dodává hydrogelům jejich unikátní vlastnosti – pružnost, schopnost rozšiřovat a smršťovat se v závislosti na absorpci vody. Díky své gelovité konzistenci a měkké textuře hydrogely napodobují živou tkáň, což jim zajišťuje vynikající biokompatibilitu

a biologickou rozložitelnost, a činí je ideálními pro široké spektrum aplikací od zdravotnictví po zemědělství. (Sutton et al., 2005)

3.3. Historie

Historie hydrogelů začala okolo druhé poloviny dvacátého století a postupně se hydrogely vyvíjely do tří hlavních generací. První generace hydrogelů byla zaměřena na dosažení vysoké bobtnavosti a mechanické pevnosti. Byly syntetizovány chemickým zesíťováním za použití různých monomerů, iniciátorů a síťovacích činidel. Ve druhé generaci, která se objevila v 70. letech 20. století, byly vyvinuty gely, které reagují na změny v prostředí, jako je pH, teplota nebo přítomnost určitých látek. Tyto hydrogely našly uplatnění především v biomedicině, například při cíleném dodávání léčiv (Yom et al., 2014). Nejnovější třetí generace hydrogelů se zaměřuje na složitější interakce mezi polymerními řetězci, což umožňuje vytváření pokročilých trojrozměrných struktur, například kombinací PEG (polyethylenglykolu) a PLA (polylaktidu, tj. kyseliny polymléčné) (Abebe a Fujiwara, 2012).

V 50. letech 20. století proběhl výzkum H. W. Kuhna, A. Katchalského a jejich spolupracovníků, kteří detailně studovali fyzikálně-chemické vlastnosti zesíťované poly(akrylové) kyseliny a poly(methakrylové) kyseliny (Katchalsky et al. 1951). První komerční využití superabsorpčních polymerů (SAP) přišlo v 60. letech, kdy společnost Union Carbide začala používat tyto polymery v zahradnictví k podpoře raného růstu sazenic cukrové třtiny (Miyamoto et al. 1960). Zásadním přelomem byl rok 1960, kdy O. Wichterle a D. Lim poprvé navrhli využití hydrofilního gelu (polyHEMA) pro výrobu kontaktních čoček. Právě tehdy vznikl termín „hydrogel“, který se v následujících dekáдах stal klíčovým pojmem v materiálovém výzkumu. R. N. Bashaw a B. G. Harper v roce 1966 popsali, jak byl zesíťovaný polyakrylát draselný poprvé využit jako vodní imobilizér při hašení požárů (Bashaw et al. 1966). Další průlom přišel v roce 1973, kdy americké ministerstvo zemědělství (USDA) vyvinulo superabsorpční polymer na bázi škrobu určený pro zemědělské aplikace. Tento materiál měl schopnost absorbovat až 400násobek své vlastní hmotnosti, avšak kvůli vysokým výrobním nákladům a nízké mechanické stabilitě v půdě nebyl masově rozšířen (Reyes et al. 1973).

V roce 1980 Gehring a Lewis prokázali, že přidání SAP do substrátu pro pěstování květin, jako je měsíček lékařský a cíníe, výrazně zlepšilo jejich odolnost vůči suchu a snížilo stres z nedostatku vody (Gehring et al 1980). O šest let později se experimentálně potvrdilo, že aplikace SAP na bázi polyakrylamidu (obchodní název Aquastock) v polosuchých oblastech výrazně zvyšuje schopnost půdy zadržovat vodu a snižuje propustnost písčitých půd. Výsledkem bylo vyšší využití vody rostlinami a zvýšení výnosů plodin i při omezeném zavlažování (Baasiri et al. 1986). V roce 1994 se Po zaměřil na studium bobtnání polymerů v různých prostředích, včetně vody, solných roztoků a fyziologických tekutin (Po et al. 1994). Následně D. L. Bouranis a jeho kolegové analyzovali využití superabsorpčních polymerů jako nosičů živin pro výrobu hnojiv s pomalým uvolňováním, což vedlo ke zlepšení hospodaření s vodou i živinami v půdě (Bouranis et al. 1995). V posledních dekáдах se syntéza SAP posunula

směrem k využití syntetických hydrofilních polymerů, zejména akrylamidu a kyseliny akrylové, které tvoří hlavní složku většiny moderních superabsorpčních polymerů (Witono et al. 2014). Avšak nárůst environmentálních problémů, zejména hromadění biologicky nerozložitelných plastů v půdě a potenciální toxicita polymerů na bázi akrylátů, vedl k hledání ekologičtějších alternativ. Současný výzkum se proto zaměřuje na vývoj biologicky odbouratelných SAP z přírodních polymerů, jako jsou polysacharidy (např. alginát, škrob, celulóza, chitosan) a proteiny (Ma et al. 2015). Tyto ekologické superabsorpční polymery jsou často připravovány roubovanou kopolymerací, která kombinuje výhody přírodních a syntetických polymerů do jediného funkčního materiálu (Olad et al. 2018 a). Díky těmto inovacím se SAP stále více uplatňují nejen v zemědělství a ochraně rostlin, ale také v medicíně, potravinářství či environmentálních technologiích, kde pomáhají snižovat spotřebu vody, optimalizovat hnojení a minimalizovat negativní dopady na životní prostředí.

3.4. Fyzické zesíťování

Fyzické zesíťování, známé také jako samoskládání hydrogelů, se vyznačuje absencí chemických vazeb a probíhá pomocí jednoduchých a pohodlných metod, které nevyžadují použití síťovacích činidel (Radwan et al. 2017). Fyzicky zesíťované hydrogely jsou obvykle reverzibilní díky dočasným spojením a reverzibilním interakcím, které lze snadno narušit malou změnou podmínek nebo aplikací mechanického stresu na reakční prostředí (Mahil et al. 2019). Fyzické síťování zamezuje vzniku chemických interakcí, což znamená, že hydrogely nepodléhají rozpouštění. Pro syntézu hydrogelů pomocí fyzického síťování lze využít širokou škálu metod, které umožňují variabilitu v jejich struktuře a vlastnostech.

3.4.1 Proces zmrazení – rozmrazování

Ve srovnání se zmrazením je rozmrazování přesně opačný proces, který probíhá v mírných teplotních rozsazích bez použití organických rozpouštědel. Pro přípravu fyzikálně zesíťovaných hydrogelů se proces zmrazování a rozmrazování obvykle mnohokrát opakuje. Většina materiálů použitých v tomto procesu je založena na celulóze nebo derivátech celulózy, které navíc zajišťují výborné bobtnací vlastnosti, a to jak v půdě, tak ve vodě (Idrissi et al. 2024)

3.4.2 Zesíťování hydrofobní interakcí

Hydrofobní interakce v hydrogelech vyžadují přítomnost nejen hydrofilních monomerů, ale také hydrofobních komonomerů, které jsou vytvářeny radikálovou kopolymerací (Zhang et al. 2018). Experimentálně bylo zjištěno, že tyto hydrofobní interakce mají větší sílu než jiné mezimolekulární síly, jako jsou van der Waalsovy síly nebo vodíkové vazby (Voorhaar et al. 2016). Intenzita hydrofobních interakcí závisí na teplotě, atomicitě uhlíku a tvaru hydrofobních segmentů. Vyšší délka a rozvětvení uhlíkového řetězce podporuje vznik silných interakcí mezi polymerními řetězci. Tyto hydrogely jsou citlivé na změny teplot, které ovlivňují jak hydrofobní interakce, tak hydrofilní interakce. Akrylovaná celulóza vykazuje hydrofobní interakce prostřednictvím -OH skupin alkylovaných řetězců. Celulóza se hydratuje

při nízkých teplotách, kdy dochází k interakci OH-skupin, zatímco při vysokých teplotách dochází ke změně struktury, která vede k vytvoření hydrogelu (Merino et al. 2020).

3.4.3 Sít'ování iontovou interakcí

Iontové zesít'ování je snadná metoda výroby iontově zesít'ovaných materiálů, která probíhá přidáním vícemocného protiiontu a vychází z principu gelování polyelektrolytického roztoku (Chen et al. 2018). Polyelektrolyty lze zesít'ovat prostřednictvím iontových vazeb s multivalentními protiionty jednoduchou metodou iontové výměny. Příkladem je roztok alginátu sodného (polymer kyseliny glukuronové a mannuronové), který lze snadno zesít'ovat s opačně nabitými ionty (Ca^{2+}) z roztoku chloridu vápenatého. Iontové zesít'ování obvykle probíhá při nižších teplotách a nachází široké využití v medicíně, zejména pro účely dodávání léků, hojení ran a tkáňového inženýrství (Pellá et al. 2018).

3.4.4 Zesít'ování vodíkovými vazbami

Vodíkové interakce (můstky) se vytvářejí mezi hydroxylovými skupinami řetězců celulózy a hrají klíčovou roli při vzniku vodíkových vazeb s vodou, čímž dochází ke vzniku hydrogelu (Zhang et al. 2018). Tyto hydrogely jsou citlivé na změny koncentrace polymerů, teploty, povahy rozpouštědla a stupně asociace funkčních skupin. Vyšší koncentrace polymerů způsobí vyšší počet vodíkových vazeb (můstků), takže se připraví organizovanější a stabilnější gel (Moreau et al. 2016). Přidáním polyethylenu k celulóзовému polymeru dochází k tvorbě vodíkových vazeb mezi kyslíkem, glykolem a hydrofilní OH-skupinou k celulóзовému polymeru (Olad et al. 2018 b).

3.5 Polymerace růstu řetězce

Tento proces následuje po iniciačních, propagačních a terminačních krocích podobných polymeraci volnými radikály. Aby mohl vzniknout polymerní řetězec, je nutné, aby monomer obsahoval nenasycenou (dvojnou) vazbu, která umožňuje růst polymerního řetězce. V okamžiku, kdy se reakční směs začne měnit na gel, lze polymeraci rozdělit do tří hlavních kategorií (Sailaja et al. 2011).

3.5.1 Polymerace roztoku

Při této polymeraci se reaktanty, iniciátory a konečný polymer mohou snadno rozpustit v rozpouštědle. Polymerace v roztoku vyžaduje velmi nízkou koncentraci katalyzátoru, vysokou konzistenci monomerů a rozpouštědla. Tato polymerace je oblíbená díky své nízké ceně, kontrolovatelnému odvodu tepla a jednodušší syntéze, což jí dává přednost před jinými homogenními polymeracemi (Zhang et al. 2005).

Příklady použití:

Polymerace roztoku byla využita pro syntézu karboxymethylcelulózy (CMC) a hexaethylcelulózy (HEC) hydrogelů v přítomnosti sít'ovacích činidel a iniciátorů.

V mnoha studiích byla kyselina akrylová a akrylamid naroubovány na CMC pomocí této polymerace (Li et al. 2016).

Výhody:

- Vysoká rychlost polymerace
- Bezpečné prostředí pro reaktanty ve vodném médiu
- Probíhá při pokojové teplotě bez potřeby dodatečného zahřívání (Cheng et al. 2017).

3.5.2 Suspenzní polymerace

Suspenzní polymerace hydrogelů probíhá v nepolárních (organických) rozpouštědlech, což ji odlišuje od polymerace v roztoku. V tomto procesu se hydrofilní reagující látky – monomery, síťovací činidla a iniciátory, nerozpouštějí v nepolárním médiu, ale tvoří v něm suspenzi.

Vlastnosti hydrogelů připravených touto metodou jsou zásadně ovlivněny těmito faktory:

Viskozitním rozdílem mezi monomery a kapalnou fází. Dále rychlostí míchání, která reguluje velikost částic výsledného hydrogelu a druhem dispergačního činidla, které stabilizuje suspenzi a ovlivňuje konečnou mikrostrukturu hydrogelu (Omidian et al. 1999).

3.5.3 Fotopolymerace

Fotopolymerace hydrogelů je proces, který probíhá prostřednictvím iniciace radikálů za přítomnosti světelného záření např. UV, viditelného nebo infračerveného záření. Tato metoda představuje in situ formu zesíťování a probíhá odlišně oproti jiným formám polymerace. Mechanismus fotopolymerace spočívá v tom, že fotocitlivé monomery interagují se světelným zářením, čímž se indukují radikály, které zahajují polymerační reakci.

Iniciace radikálů může probíhat třemi způsoby:

- Fotoštěpením
- Kationtovou fotopolymerací
- Abstrakcí vodíku (Ma et al. 2019)

Tyto radikály procházejí fázemi šíření a ukončení, stejně jako při klasické radikálové polymeraci.

Fotopolymerace je vysoce efektivní v řízených procesech gelovatění. Tato metoda se používá při přípravě hydrogelů založených na alginátu, guarové gumě a polyethylenglykolu, přičemž výsledek závisí na expozici a intenzitě UV záření (Liu et al. 2018).

3.6 Organické hydrogely

3.6.1 Kyselá syrovátka

Kyselá syrovátka, která je vedlejším produktem mlékárenského průmyslu, dlouho představovala enviromentální problém. Její množství narůstá zejména v důsledku rostoucí poptávky po řeckých jogurtech a sýrech, přičemž v EU se ročně vyprodukuje až 40 milionů tun

syrovátky pouze z výroby sýrů (Cai et al. 2008). Kyselá syrovátka může být v zemědělství potencionálně využívána jako hnojivo, a to díky vysokému obsahu organických látek, které podporují růst, výnos a kvalitu plodin (Akay et al. 2020). Nicméně je nutné pečlivě sledovat půdní podmínky, zejména živiny a pH, protože nadměrné použití může vést k odtoku a znečištění prostředí (Ketterings et al. 2017). Velká část běžných hnojiv je odplavena deštěm nebo zavlažováním, čímž se zvyšuje enviromentální zátěž (Tomadoni et al. 2019). Syrovátku lze úspěšně využít při výrobě hydrogelů, kde zlepšuje jejich účinnost postupným uvolňováním živin a vody přímo do půdy, tím snižuje spotřebu vody, a tak přispívá k ochraně životního prostředí (Durpekova et al. 2021). Díky recyklaci odpadu z mlékárenského průmyslu se náklady na výrobu hydrogelů snižují.

Hydrogely na bázi syrovátky mají tu nevýhodu, že jsou náchylné k rychlému mikrobiálnímu rozkladu v půdě, což omezuje jejich dlouhodobé používání (Durpekova et al. 2020). Účelem jedné z mnoha studií bylo zjistit, zda by bylo možné prodloužit dobu biologického rozkladu hydrogelu jeho doplněním o biologicky odbouratelný polymer – polyvinylalkohol. Ten kromě toho, že je chemicky a tepelně stabilní, je také odolný vůči degradaci ve většině fyziologických prostředí (Mehrnosh et al. 2020)

3.6.2 Hydrogely na bázi škrobu

Brambory a obiloviny jsou hlavním zdrojem škrobu (Apriyanto et al. 2022). Škrob patří mezi biopolymery ze skupiny sacharidů a je tvořen polysacharidovými řetězci glukózy. Přirozený škrob je směsí dvou polymerů, amylozy a polymeru amylopektinu. Amylóza je nerozvětvená polymerní forma škrobu, zatímco amylopektin je rozvětvená forma škrobu. Pro vědce je tento přírodní polymer zvláště zajímavý tím, že je biologicky odbouratelný a netoxický. Kromě toho je škrob také hojným a levným polymerem. Tyto vlastnosti dělají ze škrobu ideálního kandidáta pro výrobu hydrogelů s potenciálem pro zemědělskou aplikaci (Lertsarawut et al. 2021). Existuje několik metod přípravy škrobových hydrogelů. První metodou je příprava škrobu pomocí alkalické hydrolýzy. Tímto procesem vzniká superabsorpční hydrogel (SAH), jehož účinek byl testován na semenech kukuřice. Výsledky ukázaly, že tento hydrogel nejen zvyšuje schopnost půdy zadržovat vodu, ale také pozitivně ovlivňuje růst rostlin (Ekebafé et al. 2011).

Další metodou je příprava pH citlivého škrobu, který je reverzibilní při hodnotách pH 2 a 8, což umožňuje jeho využití pro řízené dodávání bioaktivních materiálů a agrochemikálií (Sadeghi et al. 2012). Třetí metodou je příprava hydrogelu ze škrobu a karboxymethylcelulózy (CMC) pomocí gama ozařování. Tento hydrogel vykazuje dobrou schopnost absorbovat vodu i při vysokých koncentracích elektrolytů navíc vykazuje menší citlivost na iontovou koncentraci ve vodě než samotný hydrogel CMC. Nejvyšší absorpce byla zaznamenána u směsi obsahující 30 % škrobu (Fekete et al. 2017). Další zajímavou metodou je chemické zesíťování bramborového škrobu a kukuřičného škrobu voskovité struktury. Výsledné hydrogely mají dobrou absorpční kapacitu jak v destilované vodě, tak i ve fyziologickém roztoku. Studie prokázaly, že tyto hydrogely pozitivně ovlivňují růst rostlin kukuřice, zejména v raných fázích

vývoje (Pathak et al. 2018). Z výše uvedených informací tedy lze konstatovat, že hydrogely na bázi škrobu představují slibný materiál pro zemědělské aplikace, a to díky své schopnosti zlepšovat zadržování vody, podporovat růst rostlin a zároveň být ekologicky šetrný. Mají tak široký potenciál pro využití v moderních zemědělských technologiích (Tab.1) (Tariq et al. 2023).

Tab. 1 Podrobnosti o hydrogelech na bázi škrobu (Tariq et al. 2023)

Polymer	Metoda syntézy	Zemědělské aplikace
Škrob a karboxymethylcelulóza	Radiačně indukovaná polymerace	Zvýšení absorpční kapacity půdy
Bramborový škrob	Chemické síťování	Zlepšuje raný růst rostliny a absorpční kapacitu půdy
Amylóza a amylopektin	Polymerace štěpu	Zlepšené zadržování vody v půdě
Škrob a chitosan	Glutaraldehyd	Řízené uvolňování herbicidů
Škrob a dimethylakrylamid	Redoxní polymerace	Absorpce vody, řízené uvolňování močoviny/hnojiva

3.7 Mechanismus využití hydrogelů jako půdního kondicionéru

Abychom lépe pochopili, jak hydrogely fungují jako půdní kondicionéry, je nutné si vysvětlit jejich mechanismus absorpce a zadržování vody. Jedním z hlavních důvodů pro použití vodních a bobtnajících hydrogelů v zemědělství je jejich schopnost postupně uvolňovat vodu, a tím umožnit delší zavlažování a dopravovat živiny k rostlinám. Schopnost hydrogelu zadržovat vodu ovlivňuje hustota zesíťování a počet hydrofilních skupin. Voda se v půdě může pohybovat neomezeně díky vibracím, které při jejím pohybu vznikají, a díky tomu jsou hydrogely v půdě daleko rozpustnější. Molekuly vody se snaží rozpustit hydrogel štěpením silných kovalentních vazeb, ale dosahují pouze rozštěpení vazeb vodíkových. Rozštěpení těchto vazeb umožňuje, aby molekuly vody zůstaly uvnitř pórů hydrogelu – proces známý jako bobtnání (De Loos et al. 2005).

Hydrofilní hydrogely lze aplikovat během výsadby nebo přímo na osivo. V zemědělství se využívají především jako nosiče živin a půdní kondicionéry. Při výběru hydrogelu je nutné zohlednit alespoň tři klíčové faktory: schopnost superabsorpce, biologickou odbouratelnost a chemické kovalentní zesíťování (Idumah et al. 2021). Voda je zachycena v mezerách mezi půdními částicemi, při kontaktu s půdou hydrogel využívá osmózu k absorpci vody do své sítě a při vysychání půdy hydrogel rychle uvolní zachycenou vodu zpět do prostředí. Tento cyklus absorpce a uvolňování vody stabilizuje půdní strukturu, protože interakce mezi půdou a vodou generované nabobtnalým hydrogelem zlepšují provzdušnění a zadržování vody (Buchmann et al. 2015). Hydrogely také snižují vyplavování živin a hnojiv ze zemědělských půd, proto se přidávají do formulací hnojiv, aby omezily jejich extrahování, čímž umožňují hnojivu zůstat na místě a postupně se uvolňovat. Tento mechanismus snižuje ztráty živin, zvyšuje produkci

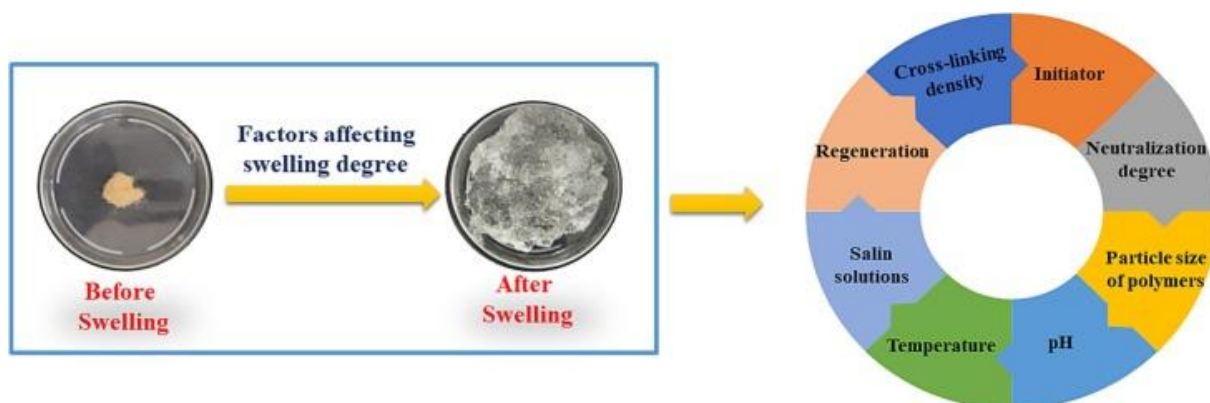
plodin a omezuje potřebu hnojiv. Bylo prokázáno, že hnojiva uložená do hydrogelu se uvolňují přibližně poloviční rychlostí ve srovnání s hnojivy aplikovanými pouze do vody (Rashidzadeh et al. 2015). Uvolňování hnojiv z hydrogelu probíhá difúzním mechanismem, který začíná procesem bobtnání, při němž voda proniká do polymerní sítě a přenáší hnojivo ven porézní strukturou hydrogelu (Shaviv et al. 2003).

3.7.1 Zadržování vody v půdě

Princip fungování činnidla zadržujícího vodu je založen především na přítomnosti hydrofilních skupin, jako jsou amidové a karboxylové skupiny, které se nacházejí v polymerní síti. Mechanismus absorpce vody spočívá v osmotickém tlaku vzniklém rozdílem koncentrací mezi vnitřním prostředím hydrogelu a vodným roztokem v půdě. Tato podobnost hydrogelu k vodě mu umožňuje absorbovat značné množství tekutiny, dokud není dosaženo jeho maximální absorpční kapacity nebo dokud se koncentrační rozdíl nevyrovná (Wang et al. 2022). Klíčovým parametrem určujícím účinnost hydrogelu je jeho maximální absorpční kapacita, která se odvíjí především od hustoty zesíťování polymerní struktury. Vyšší hustota zesíťování zajišťuje lepší schopnost hydrogelu zadržovat vodu, vyšší stabilitu a pevnost, avšak zároveň snižuje celkový objem absorpce vody (Kesharwani et al. 2021). Mezinárodní standardy pro činnidla zadržující vodu kladou důraz na stabilitu a dlouhodobé zadržování vody spíše než na okamžitou absorpční rychlost. Proto by měla být doba, po kterou hydrogel udržuje vodu, považována za klíčový parametr při jeho návrhu a hodnocení funkčnosti. Výzkumy rovněž naznačují, že efektivita hydrogelů by měla být testována v hloubce do 5 cm pod povrchem ornice, aby bylo možné posoudit jejich skutečnou účinnost a praktickou využitelnost v reálných podmínkách.

V suchých podmínkách dochází ke vzniku rozdílu vodního potenciálu mezi hydrogelovým činnidlem a půdní vodou. Tento rozdíl stimuluje postupné uvolňování vody z hydrogelu do okolní půdy, čímž zajišťuje její vlhkost a umožňuje rostlinám efektivnější absorpci prostřednictvím kořenového systému. Oproti čisté hydrogelové matici mají hydrogely smíchané s půdou výhodu nejen ve schopnosti zadržovat a uvolňovat vodu, ale také v absorpci rozpuštěných hnojiv a živin. Tím se minimalizují ztráty způsobené vyplavováním hnojiv a pesticidů a snižuje se ekologická zátěž spojená s jejich únikem do prostředí. Další výhodou hydrogelu je jeho schopnost dynamického rozšiřování a smršťování v závislosti na množství absorbované vody (Obr. 1). Tento cyklický proces vytváří v půdě velké množství pórů, které výrazně zlepšují propustnost vzduchu a celkovou kvalitu půdního prostředí. Zlepšená struktura půdy pak poskytuje optimální podmínky pro rozvoj kořenového systému rostlin, což přispívá k jejich lepšímu růstu a vyšší odolnosti vůči stresovým podmínkám (Qin et al. 2024).

Obr. 1. Faktory ovlivňující bobtnání hydrogelu (Idrissi et al. 2024)



3.7.2 Zadržování hnojiv

Amonné ionty (NH_4^+) a dusičnany (NO_3^-) patří mezi dusíkatá hnojiva, která významně ovlivňují růst rostlin, avšak zároveň přispívají ke globálnímu oteplování více než samotné emise CO_2 . Současnou výzvou je maximalizovat retenci dusíku a současně snížit emise metanu (CH_4) a oxidu dusného (N_2O). Většina živin z rozpuštěných hnojiv je zadržována hydrogelem v půdním kondicionéru, což zároveň snižuje potřebu živin v zemědělských půdách a omezuje vyplavování dusíku i emise N_2O (Lenka et al. 2017). Půdní póry jsou po zavlažování nebo dešti často vyplněny vodou, která snadno uniká z kopcovitého terénu. Půda sice nabízí dobré provzdušnění, ale nedokáže zadržet vodu. Polysacharidový hydrogel jako půdní kondicionér pomáhá tuto vadu překonat a vytváří optimální podmínky pro růst kořenů. Ionty a živiny se transportují rychleji díky adaptaci kořenového systému na přítomnost hydrogelu. Kořen je pokryt plazmatickou membránou, složenou z fosfolipidů, proteinů a steroidních sloučenin, která zvyšuje efektivitu transportu vody a živin. Nekontrolované používání hnojiv a herbicidů může vést k toxickým účinkům na necílové rostliny. Z tohoto důvodu byly vyvinuty biologicky odbouratelné agrochemikálie na bázi polysacharidových hydrogelů, které jsou bezpečné a účinné pro použití v zemědělství (Katiyar et al. 2015). Bylo prokázáno, že chitosan a chitin jako polysacharidy spouštějící obranné mechanismy rostlin bojují proti fytopatogenům, včetně rostlinných virů a hub. V současnosti experimenty ukazují, že chitosan je účinný při prevenci virových infekcí (Terry et al. 2004). Je však nutné vyhodnotit fytotoxicitu hydrogelů, aby se předešlo přerušení růstu rostlin (Rudzinski et al. 2002). Studie ukázaly, že povrchová plocha kořenů i jejich délka se zvýšila u rostlin ošetřených hydrogelem v půdním kondicionéru. Nano hnojiva jsou dalším krokem v oblasti hnojení půdy. Jedná se o rozpustná hnojiva, která jsou vnesena do hydrogelových nanočástic (Zheng et al. 2023 a). Biologicky odbouratelný hydrogel s nano hnojivy se po aplikaci rychle šíří ke kořenům. Nanočástice difundují symplastickými a apoplastickými cestami ke stvolům a listům prostřednictvím xylému (Sun et al. 2014). Pro zvýšení účinnosti hnojivového systému je vhodné obalit hnojivo biologicky odbouratelným hydrogelem, který umožní postupné uvolňování živin, a tím optimalizuje příjem kořenovým systémem. Výsledkem je vyšší výnos plodin, snížené zhutnění půdy a zlepšená efektivita hospodaření s živinami (Gebre et al. 2021).

3.8 Efektivní zavlažování a aplikace hnojiv

Voda je nezbytným faktorem pro růst rostlin a v zemědělském sektoru se stále více hledají nová zavlažovací řešení. Plodinové plantáže v suchých a polosuchých oblastech čelí nepříznivým podmínkám, protože jejich produkce je na srážkách zcela závislá. Konvenční zemědělství se potýká s problémy, jako je neefektivní využití vody, nadměrné používání hnojiv, vysoké nároky na plochu půdy a její degradaci (Alshrouf et al. 2017). Ve srovnání s tradičními metodami potřebují hydroponické systémy pouze 10-15% vody.

Hydrogely svou schopností zadržovat vodu umožňují její dlouhodobou dostupnost v půdě, což vede ke snížení frekvence zavlažování (Neethu et al. 2018). Výzkumy prokázaly, že aplikace hydrogelu v písčitých půdách výrazně zvyšuje retenci vody, čímž se snižuje potřeba častého zavlažování (Sachin et al. 2020). V jiné studii 0,4% přídavek hydrogelu zlepšil efektivitu využití vody při pěstování psinečku výbežkatého (*Agrostis stolonifera* L.) (Agaba et al. 2011).

Použití hydrogelů je zvláště doporučováno pro pěstování zeleniny na písčitých půdách, jak ukázaly výsledky z aluviálních a červených písčitohlinitých půd ošetřených hydrogelem. V těchto půdách byla dostupnost vody pro rostliny 1,5 až 2krát delší ve srovnání s neošetřenými půdami.

V oblasti zemědělství byla vyvinuta hnojiva na bázi hydrogelů, jejichž hlavní výhodou je schopnost minimalizovat frekvenci zavlažování i aplikaci hnojiv (Wei H et al. 2019). Tato hnojiva se dělí na dvě hlavní kategorie: hnojiva s pomalým uvolňováním (SRF) a hnojiva s řízeným uvolňováním živin (CRF). Hnojiva SRF jsou potažena hydrofobními materiály, které zpomalují uvolňování živin do půdy. Přestože tato technologie dokáže oddálit proces rozkladu hnojiva, jeho rychlost uvolňování a celková struktura nejsou plně kontrolovatelné (Qiao et al. 2016). Oproti tomu CRF hnojiva jsou navržena tak, aby umožňovala přesnou regulaci rychlosti, vzorce a doby uvolňování živin. Toho je dosaženo zapouzdřením hnojiva do organických nebo anorganických materiálů, které fungují jako bariéra a uvolňují živiny rovnoměrně a dle potřeby rostlin (Rozo et al. 2019).

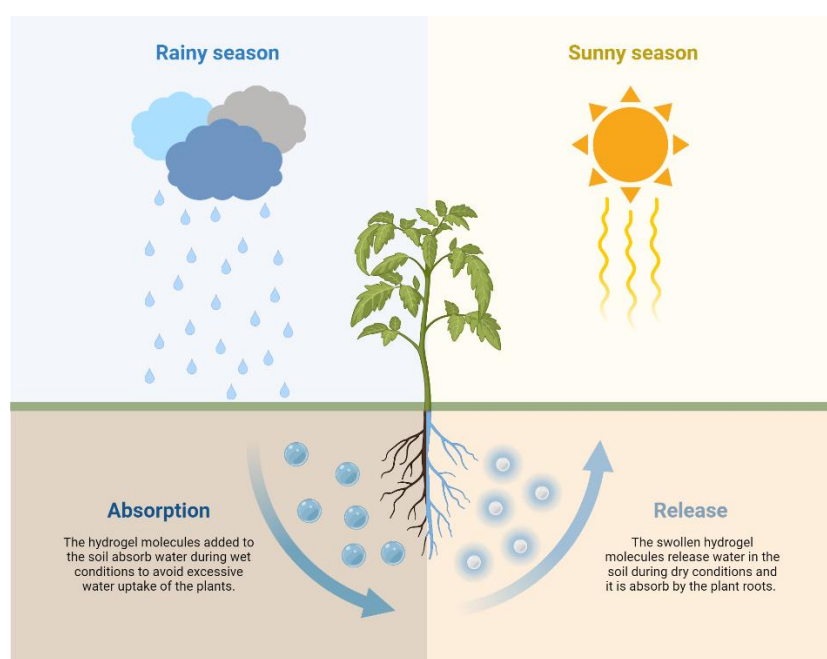
Výzkumy ukazují, že kombinace hydrogelů a hnojiv může významně zlepšit účinnost zemědělských aplikací. Například jedna ze studií se zaměřila na technologii SRF hnojiv, kdy bylo močovinové hnojivo nejprve vloženo do halloysitových nanotrubiček (HNT) ve vakuu, poté bylo kombinováno se škrobem ze sladkých brambor a následně podstoupilo kopolymeraci volných radikálů. Tento proces umožnil zpomalené a efektivnější uvolňování dusíku do půdy (Wei et al. 2019). Díky těmto technologiím dochází nejen ke zlepšení dostupnosti živin pro rostliny, ale i ke snížení ztrát hnojiv vyplavováním a k omezení negativních dopadů na životní prostředí. Hydrogelová hnojiva tak představují slibnou cestu ke zvýšení efektivity hnojení a k udržitelnému hospodaření s půdními živinami.

3.8.1 Vliv velikosti částic hydrogelu

Velikost částic hydrogelu hraje klíčovou roli v jeho schopnosti absorbovat a zadržovat vodu. S menší velikostí částic dochází ke zvětšení povrchové plochy, což vede k lepší absorpci i efektivnějšímu zadržování vody. Voda se snadno přizpůsobí trojrozměrné síťové struktuře

hydrogelu a vyplní mezitkáňové prostory, které vznikají mezi nabobtnalými částicemi hydrogelu (Bao et al. 2011). Právě tyto menší částice, díky své vyšší reaktivitě s vodou, zajišťují výraznější schopnost hydratace a retence (Obr. 2). Výzkum superabsorpčního hydrogelu na bázi celulózy se zaměřil na absorpci a zadržování vody u částic různé velikosti, pohybující se v rozmezí od 10 mesh do 80 mesh (Mesh – počet ok na jeden palec (2,54 cm)). Výsledky ukázaly, že menší částice hydrogelu vykazují výrazně vyšší absorpční a retenční kapacitu, zatímco větší částice tyto vlastnosti mají méně výrazné. Zároveň se ukázalo, že s klesající velikostí částic se zvětšují intersticiální prostory mezi nimi, což umožňuje lepší pronikání vody a zlepšuje celkovou absorpční účinnost superabsorpčních hydrogelů (Shahid et al. 2012).

Obr. 2 Hydrogelová nabobtnávající voda pro rostliny (Abobatta et al. 2018)



3.8.2 Vliv velikosti částic půdy

Velikost částic půdy hraje zásadní roli při zadržování vody, což má přímý dopad na růst rostlin. Různé typy půd se liší velikostí svých částic, což ovlivňuje jejich schopnost udržet vodu. Menší částice umožňují lepší zadržování vody, zatímco větší částice tuto schopnost snižují. Jílovité půdy, díky své jemné struktuře, dokážou uchovat více vody než hlinité či jílovité půdy, které mají o něco větší částice, a tedy menší retenční schopnost (Onyelowe et al. 2015). Na opačném konci spektra stojí písčité půdy, které se skládají z největších částic a mají minimální schopnost zadržovat vodu, neboť voda jimi snadno prosakuje do hlubších vrstev. Pro zlepšení schopnosti půd zadržovat vodu se osvědčilo použití hydrogelů (Bongiorno et al. 2020). Aplikace hydrogelu do půdy prokázala významné zvýšení retenční kapacity vody (WHC). Půda bez hydrogelu zadržovala 71,6 % vody po 15 dnech a pouze 53,4 % po 30 dnech. Naopak při aplikaci hydrogelu se tyto hodnoty zvýšily na 90,4 % po 15 dnech a 78,1 % po 30 dnech (Rizwan et al.

2021). Z výsledků vyplývá, že hydrogel může efektivně prodloužit dostupnost vody pro rostliny, a tím podpořit jejich růst, zejména v suchých oblastech.

Další studie se zaměřily na rozdíly v retenční kapacitě vody mezi různými typy půd při aplikaci hydrogelu. Retenční kapacita byla stanovena na základě tří hlavních parametrů: nasycená kapacita vody (θ_s), zbytkový obsah vody (θ_r) a dostupný obsah vody (AWC). Výsledky ukázaly, že hodnota θ_s se při aplikaci hydrogelu zvýšila 2,2krát u písčité půdy, 1,8krát u hlinité půdy a 1,5krát u jílovité půdy ve srovnání s kontrolní skupinou (Montesano et al. 2015). Podobně i zbytkový obsah vody (θ_r) rostl s vyšší koncentrací hydrogelu. Například při koncentraci 8 g/kg byla hodnota θ_r u písčité půdy 5krát vyšší než u kontrolní skupiny, u hlinité půdy 3,5krát vyšší a u jílovité půdy 2,5krát vyšší. Tento jev je vysvětlován nižší kationtovou výměnnou kapacitou písčité půdy, což vede k větší expanzi polymeru hydrogelu, a tím k lepšímu zadržování vody. Dostupný obsah vody (AWC) se při aplikaci hydrogelu rovněž významně zvýšil. U písčité půdy byla hodnota AWC třikrát vyšší než u kontrolní skupiny při koncentraci hydrogelu 8 g/kg.

3.9 Skleníkový nádobový experiment s kukuřicí

Květináčový experiment byl realizován ve výzkumném skleníku Zemědělské fakulty Jordánské univerzity vědy a technologie. Cílem bylo vyhodnotit vliv hydrogelu na růstové parametry kukuřice (*Zea mays* L.) ve dvou typech půdy – písčité a jílovitohlinité. Pro stanovení textury půdy byla použita metoda hustoměru podle systému USDA. Květináče obsahovaly půdu obohacenou o čtyři různé koncentrace hydrogelu (0 %, 0,25 %, 0,5 % a 1 % hmotnostního podílu hydrogel/půda). Experiment byl navržen v rámci kompletního randomizovaného blokového designu (RCBD) s třemi opakováními. Hydrogel byl před aplikací zvážen a důkladně promíchán s 5,5 kg zeminy v každém květináči. Do každé nádoby byla zaseta tři semena kukuřice a zalévána vodou z vodovodu. Zavlažování probíhalo dvakrát až třikrát týdně s cílem udržet úroveň vody na polní kapacitě (gravimetrická báze). Po vyklíčení byly sazenice proředěny na jednu rostlinu na nádobu. Hnojení probíhalo podle doporučení zemědělců v dané oblasti, přičemž byl aplikován síran amonný (100 kg ha^{-1} za vegetační období) a NPK hnojivo (20:20:20) v dávce 320 kg ha^{-1} za vegetační období. Hnojiva byla aplikována fertigací, rozdělenou do pěti dávek v průběhu vegetace. Fertigace je velmi účinný a flexibilní nástroj, který umožňuje přesně nastavit a načasovat aplikaci živin. Jde o míchání vodorozpustných hnojiv se závlahovou vodou, které umožňuje přesné dodání výživy přímo k rostlině. Po osmi týdnech byly rostliny sklizeny ve fázi kvetení a byly měřeny klíčové růstové parametry, včetně průměru stonku, výšky rostliny a čerstvé hmotnosti nadzemní biomasy. Poté byla biomasa sušena v sušárně při teplotě 70°C po dobu 48 hodin, aby byla stanovena její suchá hmotnost (DW). Efektivita využití vody (WUE) byla vypočtena jako poměr suché hmotnosti nadzemní biomasy (DW) k celkovému množství aplikované vody (IW) na květináč. Pro stanovení relativní efektivity využití vody (RWUE) byly hodnoty WUE při různých dávkách hydrogelu porovnány s hodnotami WUE kontrolní skupiny (0% hydrogel) pro každý typ půdy (Albalasmeh et al. 2022)

V písčitých a jílovitohlinitých půdách bylo prokázáno, že se zvyšující se koncentrací hydrogelu dochází ke zvýšení rostlin kukuřice. Jílovitohlinitá půda poskytla největší výšku rostlin (155,2 cm) při koncentracích 0,5 procenta (w/w), což byl nárůst o 26,3 % oproti kontrole. V písčité půdě měla kukuřice pěstovaná při 1 % koncentraci hydrogelu výšku 93,37 cm, což byl více než dvojnásobek výšky kontrolních rostlin (44,30 cm). Podobně se s rostoucí dávkou aplikace hydrogelu zvyšovala čerstvá a suchá hmotnost i průměr stonku. Přídavek hydrogelu zpomalil rychlost ztráty půdní vlhkosti v důsledku odpařování a většina vody byla absorbována samotným hydrogelem, což umožnilo snadnější přístup k vodě pro rostliny (Mohawesh a Durner, 2019). Vzhledem k vysokým teplotám v suchých a polosuchých oblastech bude snížení ztrát odpařováním s přídavkem hydrogelu ještě výraznější (Duarte et al. 2019). Tento jev lze vysvětlit snížením hydraulické vodivosti ošetřené půdy (Mohawesh a Durner, 2019). I když bylo množství závlahy stejné pro všechna ošetření, zvýšení růstu kukuřice lze připsat hydrogelu, který zvýšil dostupnost vody a udržel obsah vlhkosti v půdě na příznivé úrovni pro růst rostlin. 1% hydrogelová úprava byla použita pouze pro písčitou strukturu půdy, protože se předpokládalo, že hydrogel v tomto poměru bude mít výraznější vliv na vlastnosti půdy i na výkonnost růstu rostlin. (El-Asmar et al. 2017) také ukázali, že aplikace hydrogelu zvýšila růst kukuřice v jílovitých a písčitohlinitých půdách. Použití hydrogelu může zlepšit růst a přežití rostlin během sucha a dlouhých období bez srážek (El-Kady a Borham, 2013). Obecně platí, že hodnoty WUE se zvyšovaly s rostoucí koncentrací hydrogelu. U písčité půdy se WUE zvýšilo z 0,13 g/ml (kontrola) na 0,41 g/ml při koncentraci hydrogelu 1 %. Také pro jílovitohlinitou půdu se WUE zvýšila z 0,36 g/ml (kontrola) na 0,67 g/ml při koncentraci hydrogelu 0,5 %. Efektivita využití vody pro rostliny pěstované v jílovitohlinité půdě byly vyšší než u rostlin pěstovaných v písčité půdě. Když se vezme v úvahu RWUE, účinek hydrogelu v písčité půdě byl lepší než v jílovitohlinité půdě. Při koncentraci 0,5 % hydrogelu byla RWUE v písčité půdě 2,12 ve srovnání s 1,86 v jílovitohlinité půdě (Albalashmeh et al. 2022)

3.10 Nádobové a polní pokusy

Zemědělská produkce je především ekonomicky motivována, což znamená, že zvyšování výnosů a efektivity pěstování je klíčovým faktorem pro zemědělské činnosti. V rámci této problematiky bylo provedeno mnoho studií, které se zaměřují na využití superabsorpčních hydrogelů (SH) ke zvýšení výnosů, zlepšení ekonomiky zemědělských podniků a posílení sociálních přínosů v zemědělství. Jednou z metod zkoumání vlivu hydrogelů na růst rostlin je nádobový experiment, který umožňuje sledovat dopady SH na klíčení semen a růst rostlin v kontrolovaných podmínkách (Wróblewska et al. 2019). V takovém experimentu jsou rostlinná semena umístěna do růstové komory, kde jsou vystavena různým variantám superabsorpčních polymerů. Po několika dnech lze pozorovat rozdíly v klíčení, výšce rostlin, délce kořenů a celkové biomase. Výsledky těchto pokusů ukazují, že SH mohou významně snížit ztráty živin v půdě (Wen et al. 2017) a zvýšit přežívání rostlin v nepříznivých podmínkách (Cheng et al. 2020). Významným faktorem ovlivňujícím růst a výnosy plodin je dávkování SH, konkrétní druh plodin a jejich individuální reakce na aplikaci hydrogelů. Bylo zjištěno, že míra klíčivosti bavlny se po ošetření SH zvýšila z 66,67 ± 5,77 % (v půdě ošetřené močovinou) na

86,67 $\pm$ 5,77 %. Podobné výsledky byly pozorovány také u biomasy (Tab. 2), kdy granule hnědého uhlí s močovinou (BCU) s pomalým uvolňováním přispěly k výraznému zvýšení výnosů. Výzkum prokázal, že v půdách ošetřených BCU byl růst biomasy o 27 % vyšší v půdě Tenesol a o 23 % vyšší v půdě Dermosol ve srovnání s aplikací samotné močoviny (Saha et al. 2019). Důležitým zjištěním přinesl výzkum Ahmeda M. Elbarbyho, který zjistil, že aplikace hydrogelů vedla k nárůstu výnosu zrna kukuřice o 50 % (Elbarbary et al. 2017). Další výzkumy potvrzují, že hydrogely mohou stimulovat růst plodin až o 70 % ve srovnání s půdami, které nebyly ošetřeny těmito polymery.

Tab. 2. Rostlinná výroba se superabsorpčními hydrogely na bázi celulózy (Liu et al. 2022)

Typ SH	Dávka (kg/ha)	Plodina	Výnos (t/ha)	Zvýšení výnosu (%)
Na bázi celulózy	2,5	Cukrová třtina	77,7	11,5
Na bázi celulózy, ozářené	5	Pšenice	Neuvedeno	8,48
Na bázi celulózy	2,4	Maniok	49	48,5
Škrob na bázi celulózy	30	Rajče	45,3	28
Na bázi ethylcelulózy	150	Pšenice	2,9	14,4
Na bázi celulózy	10	Fazole	1,4	11,1
Na bázi celulózy	3	Okurka	35,8	136

Existují také výzkumy ve kterých vědci zaznamenali 10% nárůst klíčivosti pšenice (*Triticum aestivum* L.) Zjištěno tak bylo z květináčového experimentu, když bylo do písčitohlinité půdy přidáno 0,3–0,4 % hydrogelu na bázi polyakrylamidu (Rehman et al. 2011). Podobně zaznamenali vyšší hustotu vzešlé rýže (*Oryza sativa* L.) na pozemcích ošetřených hydrogelem s karbonylamidovou strukturou ve srovnání s kontrolními plochami (186 vs. 158 rostlin), a to bez ohledu na způsob setí (např. plošný výsev, hrůbkový nebo záhonový způsob). Naopak v experimentu nebyl pozorován žádný významný rozdíl v klíčivosti semen pšenice, ječmene (*Hordeum vulgare* L.) ani cizrny (*Cicer arietinum* L.) v písčitohlinité nebo hlinité půdě. Co se týče vývoje sazenic, zde již výsledky aplikace hydrogelů ukazují trvale pozitivní účinky. Výzkumy u různých plodin, včetně pšenice, ječmene, cizrny a rýže, potvrzují jejich přínos pro raný růst rostlin (Akhter et al. 2004). Například u pšenice zaznamenali delší výhony při aplikaci 0,3% HG (24,36 cm) a 0,4% HG (25,80 cm) ve srovnání s neošetřenou půdou (16,24 cm). Rehman et al. (2011) ve své studii zjistil, že aplikace hydrogelu významně zvýšila výšku rýže (84 vs. 71 cm). Výzkumy rovněž ukázaly, že čerstvá i suchá hmotnost výhonů pšenice, ječmene a cizrny byly při použití hydrogelu vyšší bez ohledu na typ půdy (Akhter et al. 2004). Stejná studie potvrdila i zvýšení výnosu rýžových zrn (2,39 vs. 2,25 t ha⁻¹), což bylo přičítáno lepšímu zadržování vody v půdě.

Ve větším polním měřítku byl pozorován pozitivní vliv aplikace hydrogelu (225 kg ha^{-1}) na tvorbu sušiny sóji (*Glycine max* (L.) Merr.), zrychlený růst rostlin a vyšší index sklizně (Yazdani et al. 2007). Prokázalo se, že použití hydrogelu v zavlažovaných polních podmínkách umožnilo u fazole (*Phaseolus vulgaris* L.) dosáhnout stejného výnosu jako při standardním zavlažování, což potvrzuje účinnost hydrogelů ve středomořských a aridních oblastech (Satriani et al. 2018). Výhody hydrogelů však nejsou omezeny pouze na obiloviny a luštěniny – pozitivní účinky byly zaznamenány i u dalších plodin, jako je káva (*Coffea spp.*) (Souza et al. 2016). Přesto je důležité zdůraznit, že účinnost hydrogelu jako půdního kondicionéru může postupně klesat v důsledku opakovaných cyklů smáčení a sušení (Akhter et al. 2004). Pro dosažení maximální efektivity je proto vhodné aplikovat hydrogel co nejbližší k setí plodin. Ačkoli většina studií se zaměřuje na lokální aplikaci, metaanalýza (Zheng et al. 2023 b) naznačila přibližně 13% zvýšení výnosu asijských plodin při použití hydrogelů v polním měřítku, bez ohledu na typ plodiny nebo dávkování. Různé studie navrhuje rozličné aplikační dávky hydrogelů. (Yazdani et al. 2007) doporučují dávku 225 kg ha^{-1} , zatímco (Jahan et al. 2020) považují za optimální dávku 100 kg ha^{-1} z hlediska rovnováhy mezi výnosem a ekonomickou efektivitou. Na druhé straně (Bana et al. 2023) zjistili, že u pšenice je účinnost hydrogelu významná pouze do dávky $2,5 \text{ kg ha}^{-1}$, přičemž vyšší koncentrace ($5\text{--}7,5 \text{ kg ha}^{-1}$) již nepřinášely další zvýšení výnosu. Tyto výsledky potvrzují, že ačkoliv hydrogely mají obrovský potenciál pro zemědělství, jejich účinnost závisí na specifických podmínkách, jako je typ půdy, klimatické podmínky a vhodná aplikační dávka.

3.11 Vliv hydrogelu na růst rajčat

Tento experiment byl proveden ve státě Piauí v Brazílii kde většina půd má písčitou strukturu. Písčité půdy mají nižší schopnost zadržovat vodu a živiny než jílovité půdy, a proto při použití kapkové závlahy by mělo být aplikováno větší množství vody a živin, aby byly uspokojeny potřeby plodin, protože půda má nízkou dostupnost vodní kapacity (AWC) a nízkou kationtovou výměnu (CEC). Experiment se skládal z 12 ošetření uspořádaných do randomizovaných bloků ve faktoriálu 4×3 se 4 replikacemi při čtyřech koncentracích hydrogelu ($0, 1, 2, 3 \text{ g/dm}^3$) začleněnými do půdy s třemi úrovněmi hnojení (80, 100 a 120% doporučeného hnojení). Jednotka byla reprezentována jednou rostlinou v květináči o objemu 14 dm^3 . Rostliny byly rozmístěny ve vzdálenosti $0,5 \times 1,0 \text{ m}$ pro celkem 48 experimentálních jednotek. Koncentrace hydrogelu (kopolymer polyakrylátu draselného) byla stanovena na základě doporučení 2 g/dm^3 od výrobce Forth Jardim. Přípravek byl chemicky analyzován a bylo zjištěno následující: 99,18 % K a 0,82 % S; frakce velikosti částic: 37 % - $>24 \text{ mesh}$, 27 % - $24 \text{ až } 35 \text{ mesh}$, 9 % - $35 \text{ až } 48 \text{ mesh}$ a 27 % - $<48 \text{ mesh}$; bobtnání: 429 ml vody na každý 1 g suchého polymeru za přibližně 10 minut. Nádoby byly naplněny 10 dm^3 půdy s přihlédnutím k očekávanému nárůstu objemu hydrogelu. V průběhu experimentu bylo plánování závlahy vypočítáno pomocí evapotranspirace plodin stanovené pomocí vážícího lyzimetru. Maximální, průměrná a minimální úroveň zavlažování byla 2,42 mm, 1,55 mm a 0,24 mm. Rostlinným materiálem bylo cherry rajče "BRS Zamir F1" a sazenice byly produkovány v polystyrénových podnosech s použitím komerčního substrátu PLANTMAX.® Sazenice byly přesazeny do květináčů 20 dní po výsevu, kdy měly čtyři až šest definitivních listů, takže v

každém květináči zůstala pouze jedna rostlina. Provzdušňování půdy (SM) při koncentraci hydrogelu 3 g dm^{-3} dosáhla 36,44 %, zatímco v půdě bez hydrogelu byla SM pouze 16,24 %, což představuje nárůst o 21,39 %. Rychlost růstu výšky rostliny mělo lineární odezvu, ukazoval 2,08 cm/den při 3 g/dm^3 koncentrace. Nejvyšší růstová rychlost průměru stonku byla dosažena při 3 g/dm^3 koncentrace, která dosáhla 0,05 mm za den. Počet listů měla také lineární odezvu s 2,37 listy za den při nejvyšší koncentraci hydrogelu (Dias et al. 2024)

3.12 Vliv hydrogelu na pěstování vinné révy

V této práci byly testovány tři následující hydrogely: SH1 – granulovaný superabsorpční polymer polyakrylát draselný, SH2 - krystalický superabsorpční polymer polyakrylát draselný, SH2 – krystalický polymer odvozený od organického materiálu (lignin-sulfonáty). Maximální absorpční kapacita vody tří superabsorpčních hydrogelů se 6 replikáty na ošetření byla definována přidáním 300 ml vody na 0,5 g každého SH polymeru. Vzorky byly váženy každých 10 minut, jakmile nebylo zaznamenáno žádné okrajové zvýšení hmotnosti, byla maximální absorpce vody (g/g) vypočtena jako: (hmotnost v nabobtnalém stavu – hmotnost v suchém stavu) / hmotnost v suchém stavu. Vzorky byly poté podrobeny dehydrataci při 30 °C a 45 % RH (3 replikáty) a při 40 °C a 45 % RH (3 replikáty). Během procesu byla míra dehydratace sledována vážením vzorků každých 30 minut. Po výše uvedeném postupu opakování hydratačního – dehydratačního a opět hydratačního cyklu byla po úplné dehydrataci vzorků změřena reabsorbovaná voda.

Do písčitohlinité půdy byli přidány tři SH, aby bylo pro všechny vzorky půdy stejné množství vody absorbované polymery bez ohledu na ošetření, dávka SH přidaná do půdy se lišila podle deklarované maximální absorpční kapacity vody každého polymeru. Dávky byly 2,6 mg/g půdy pro SH1, 0,62 mg/g půdy pro SH2 a 23 mg/g půdy pro SH3, vypočtené jako dávka potřebná k dosažení maximální absorpce vody polymery $0,2 \pm 0,01 \text{ ml/g}$ půdy ve všech ošetřeních. Dvanáct jednoletých vinic mezidruhového hybridu *Vitis* SO4 (*Vitis berlandieri* x *Vitis riparia*) získaných zakořeněnými řízků. Tři révy byly přesazeny bez SH přidaného do substrátu, tři s 2,6 mg/g SH1 v substrátu, tři s 0,62 mg/g SH2 a zbývající tři s 23 mg/g SH3. Vinice byla plně zalévána od pupenů (6. dubna 2023) do 13. července [den v roce (DOY) 194]. Poté bylo zavlažování pozastaveno do 21. července (DOY 202) a od 22. července byly všechny vinice opět plně zalévány.

Všechny tři testované SH měly dramaticky odlišnou absorpci vody. SH1 a SH2 na bázi polyakrylátu draselného měly maximální absorpci vody 83,6 a 369,6 g H_2O na 1 g polymeru, zatímco SH3 na bázi lignin-sulfonátu měl maximální absorpci vody 9,2 g $\text{H}_2\text{O/g}$. Ve druhém cyklu zalévání vykazovaly SH1 a SH2 významné snížení maximálního množství absorbované vody ve srovnání s prvním cyklem (-23 % a -15 %), zatímco u SH3 k tomu nedošlo. Při udržování na 30 °C a 45 % relativní vlhkosti byla rychlost ztráty vody významně vyšší v SH2 (44,6 g $\text{H}_2\text{O/g/h}$), následovaný SH1 (7,5 g $\text{H}_2\text{O/g/h}$) a SH3 (1,16 g $\text{H}_2\text{O/g/h}$). Stejný vzorec byl zachován i při 40 °C. Při přechodu z 30 °C na 40 °C byl pozorován významný nárůst ztráty vody u SH1 (+97 %), zatímco rozdíly v SH2 a SH3 nebyly významné. Při aplikaci na substrát révy vinné v

květináčích nezměnil žádný z testovaných SH stonků révy Ψ (úroveň vodního potenciálu při plném zavlažování. Po 4 dnech pozastaveného zavlažování byla hodnota Ψ stonku kontrolní révy $-1,15$ MPa, zatímco všechna ošetření SH vykazovala významně vyšší Ψ stonku (mezi $-0,85$ MPa a $-0,90$ MPa). Po 8 dnech od přerušení zavlažování se Ψ stonku kontrolní révy snížilo na $-1,63$ MPa, zatímco réva SH3 měla nejvyšší Ψ stonku ($-1,4$ MPa) a SH1 i SH2 si zachovaly výrazně vyšší Ψ stonku než kontrolní réva ($-1,47$ MPa, respektive $-1,50$ MPa) (Frioni et al. 2024)

3.13 Vliv hydrogelu na zelených střechách

Na střeše Katedry biologických věd Univerzity v Terstu byla provedena studie mezi začátkem dubna a koncem září roku 2013. Klimatické údaje pro tuto oblast v letech 1995–2012 uvádějí průměrnou roční teplotu $15,7$ °C, s maximem 25 °C a minimem $6,8$ °C dosaženým v červenci a lednu, průměrný roční úhrn srážek byl 843 mm. Základem substrátu je směs minerálních materiálů obohacená o $2,9$ % organických látek. Velikost zrn se pohybovala od $0,05$ mm do 20 mm s celkovou pórovitostí $67,35$ %, hodnota pH = $6,8$. Experimentální moduly byly rozděleny do dvou hlavních kategorií na základě hloubky substrátu: 8 cm a 12 cm. V rámci každé kategorie bylo využito 15 květináčů, z toho 10 z nich bylo naplněno substrátem smíchaným s vodou nasávkovým polymerním hydrogelem (zesíťovaná polyakrylová kyselina draselná, STOCKSORB 660 medium, Evonik Industries), a to ve dvou koncentracích: $0,3$ % hm. (5 nádob) a $0,6$ % hm. (5 nádob). Pět zbylých nádob z obou kategorií bylo použito jako kontrola (naplněny pouze substrátem). Sestaveno tedy bylo šest různých typů vrstvení, z nichž každý byl pětkrát opakován. Dne $17.$ dubna 2013 byl do každého modulu přesazen jeden jedinec šalvěže lékařské (*Salvia officinalis* L.). *Salvia officinalis* je vytrvalý, stálezelený podrost s dřevnatými stonky, šedavě chlupatými listy a fialovými květy. Pochází z oblasti Středomoří, ale dnes je široce naturalizován i mimo původní stanoviště. Šalvěj lékařská byla vybrána na základě své schopnosti přežít v podmínkách zelených střech (Savi et al., 2013).

Po výsadbě byl každý květináč během dvou týdnů třikrát zavlažen celkovým množstvím 34 mm vody. V období studie dostávaly rostliny přirozené srážky, ale v extrémně suchých obdobích, kdy se listy alespoň u 50 % rostlin jevily jako zvadlé a svinuté, byla poskytnuta dodatečná závlaha ($3-18$ mm). Vztahy mezi obsahem vody a vodním potenciálem substrátu, polymerního hydrogelu a směsí substrát-hydrogel $0,3$ % a $0,6$ % byly měřeny na začátku experimentu (duben) a na konci vegetativního období (září). Křivky uvolňování vlhkosti byly vypracovány za účelem kvantifikace teoretického objemu vody dostupné rostlinám, garantovaného právě těmito složkami substrátu (Savi et al. 2013). Stav vody rostlin byl sledován periodickým měřením vodního potenciálu listů a vodivosti listů na vodní páru s cílem upozornit na možné rozdíly mezi rostlinami rostoucími v různých experimentálních modulech. Na začátku pokusu byly odebrány vzorky 10 rostlin *S. officinalis* v květináčích ze stejného materiálu, který byl použit k vegetaci pokusných modulů, aby bylo možné stanovit počáteční nadzemní biomasu a kalibrovat metodu nedestruktivního odhadu biomasy během

studijního období. Na každé rostlině byly spočítány všechny listy (NL) a změřena suchá hmotnost (DWL) 10 reprezentativních listů na rostlinu.

Vybrané listy byly různorodé velikosti a odrážely strukturu koruny rostliny. Nadzemní biomasa byla odhadnuta následovně: $NL \times \text{průměrná hodnota DWL}$. Rostliny byly poté seříznuty v přechodové zóně kořen-stonek, nadzemní části byly sušeny v sušárně po dobu 48 hodin při teplotě 70 °C a byla zaznamenána jejich skutečná celková hmotnost sušiny (Ba). Mezi odhadnutou a skutečnou biomasou rostlin byl stanoven alometrický vztah. Na konci června byla biomasa rostlin rostoucích v experimentálních nádobách odhadnuta spočítáním všech listů každé rostliny, a také změřením DWL 5 reprezentativních listů na rostlinu. Nadzemní biomasa každé rostliny byla odhadnuta výše popsaným způsobem a alometrický vztah byl použit k extrapolaci skutečné celkové suché hmotnosti (Ba) rostliny. Nadzemní biomasa rostlin rostoucích ve 12 cm hlubokém substrátu byla totiž přibližně o 50 % vyšší než biomasa zaznamenaná v 8 cm substrátu. Křivky uvolňování vlhkosti byly měřeny v dubnu (a-d) a v září (e-g) a každá křivka byla založena na nejméně 21 měřeních vodního potenciálu - Ψ (mezi 0 a -6,9 MPa) a odpovídajícího obsahu vody ve vzorku. Na začátku experimentu v dubnu byl obsah vody při nasycení (SWC) substrátu a směsi substrátu a hydrogelu 0,3 % a 0,6 % $0,48 \pm 0,01$ g/g, $0,70 \pm 0,12$ g/g a $1,04 \pm 0,09$ g/g. SWC polymerního hydrogelu byla $115,6 \pm 2,46$ g/g. Přídavek 0,3% a 0,6% hydrogelu k substrátu tedy vedl ke zvýšení obsahu vody při nasycení o 45,8 %, resp. 116,7 %. Regresní křivky vyjádřené funkcí $y = y_0 + (a / x) + (b / x^2)$ byly použity k extrapolaci obsahu vody při $\Psi = -1,5$ MPa, který byl považován za referenční bod trvalého vadnutí (Kramer a Boyer, 1995). Teoretické množství vody dostupné pro vegetaci (AWC) bylo vypočteno jako rozdíl mezi SWC a obsahem vody při $\Psi = -1,5$ MPa. AWC různých složek substrátu jsou uvedeny v tabulce 1a. Asi 88 % vody uložené substrátem bylo pro rostliny skutečně dostupné, zatímco u směsi substrátu-hydrogelu 0,6 % se dostupnost zvýšila na 93 % (Savi et al. 2014)

3.14 Vliv hydrogelu na golfové hřiště

Experimentální green s přibližnou plochou 278 m² se nachází v Club de Campo del Mediterráneo podél středomořského pobřeží Španělska. Obsahuje čtyři experimentální plochy (P1, P2, P3, P4) o délce přibližně 40 m² (Tab. 3). Substrát se skládá z 26-40 cm písčitého podloží, které je překryto 10 cm štěrkovou vrstvou obsahující drenážní trubky, které zachycují vyluhované sloučeniny a odvádějí je k odtoku. Na výstupu jsou umístěny recipienty, které sbírají vyluhované látky pro kontrolní účely. Každá plocha je po stranách a na dně pokryta geomembránou, která nezávisle na sobě sbírá a odvádí veškerou infiltrovanou vodu směrem k drenážnímu výstupu. Každá plocha má konstrukční řešení a skládá se z různých substrátů. Jedna plocha (P2) byla konstruována podle požadavků USGA (USGA, 2004), které stanovují, že greeny musí obsahovat písek a organickou hmotu v poměru 80:20. Ostatní konstrukční návrhy byly navrženy za účelem vyhodnocení jejich vlivu na odvodnění a transport kontaminantů. Několik ploch obsahuje rašelinu (organickou hmotu) a TerraCottem® (hydrogel). TerraCottem® je přísada vytvořená ze směsi různých kopolymerů akrylamidu, kyseliny

akrylové, hnojiv a vulkanické horniny. Absorbuje vodu až do 45 % své hmotnosti, takže je schopna vytvářet zásoby vody v půdě. Tyto sloučeniny se používají ke zlepšení účinnosti využití vody a živin, a tím ke zlepšení kvality trávy a snížení rizika kontaminace recipientů povrchových a podzemních vod.

Nejpozoruhodnějším rozdílem mezi plochami je to, že P4 (100% písek) má nejvyšší míru infiltrace, zatímco plochy obsahující organickou hmotu (P1 a P2) mají míru infiltrace nejnižší. Pro výsadbu byl vybrán psineček výběžkatý (*Agrostis stolonifera*), tato odrůda trávy je zelená po celý rok a Club de Campo del Mediterráneo ji hojně využívá. Vyžaduje vysokou úroveň údržby kvůli rychlému růstu v létě a vysokým nárokům na vodu. Zeleň byla založena a vysazena v srpnu 2008. Aktivita na greenu pokračovala až do prosince roku 2011. V tomto období, konkrétně od 26. srpna 2008 do 31. prosince 2011 došlo na experimentální zelené ploše k 251 mm srážkám a 602 až 625 mm zavlažování. V průběhu roku 2009 byly pokyny pro zavlažování navrženy tak, aby doplňovaly srážky a splňovaly požadavky systému na vodu. Od března do prosince 2009 ET_o byl 936,9 mm. V průběhu roku 2010 bylo cílem zavlažovacího systému zachovat vizuální kvalitu trávníku, a proto byla zachována vysoká úroveň vlhkosti; ET_o za leden až prosinec 2010 činil 1009,2 mm. Podle analýzy vodní bilance se odtok vody na pozemcích doplněných organickou hmotou (P1 a P2) zvyšoval s rostoucí úrovní zavlažování. Na písčitéch pozemcích (P4) bylo procento odvodnění obecně podobné bez ohledu na úroveň zavlažování. Při porovnání parcel P1 odvedlo vodu o 42 % méně než u P2, a P3 odvedlo o 32 % méně vody než P4. Retence vody byla větší na ploše P2, která byla doplněna organickou hmotou, ve srovnání s plochou 100 % pískovou (P4). Retence vody však byla daleko větší na parcelách obsahujících hydrogel (P1 a P3), což zcela odpovídá vlastnostem tohoto materiálu (Campo et al. 2019).

Tab. 3. Stavební charakteristiky a fyzikální vlastnosti každého pozemku (Campo et al. 2019)

Parcela	Rozloha (m ²)	Složení	Organická hodnota (%) (hmotnosti)	Objemová hmotnost (g/cm ³)	Pórovitost
P1	37,5	80% písek 20% rašelina 145 g/m ² hydrogel	4,045	1,467	40,14
P2	37,6	80 % písek 20% rašelina	7,397	1,394	51,65
P3	36,5	100% písek 145 g/m ² hydrogel	0,178	1,784	34,41
P4	35,4	100 % písek	0,139	1,684	34,88

3.15 Potencionální enviromentální rizika

Přestože hydrogely mají mnoho užitečných využití, je nezbytné zvážit možná rizika pro životní prostředí. Mnohé hydrogely se rozkládají velmi pomalu, protože nejsou biologicky snadno rozložitelné. Pokud se s nimi po použití nesprávně zachází, mohou se hromadit v půdě nebo vodních útvarech, což vede k poškození přirozených ekosystémů. Biologicky nerozložitelné hydrogely mohou narušit rovnováhu organismů, které v těchto ekosystémech žijí. Kontaminace hydrogelem může nastat v důsledku nesprávné likvidace nebo neúmyslného úniku do vodních toků. V takových případech může dojít k zhoršení kvality vody a ohrožení vodního života, což má negativní dopad na biodiverzitu a vodní ekologii. Použití gelu v zemědělské půdě může vést k úbytku přírodních materiálů. Například nadměrná aplikace hydrogelu může vytěsnit organickou hmotu nebo jiné půdní složky, čímž se mění přirozené složení půdy a narušuje koloběh živin.

Některé gely se vyrábějí ze syntetických polymerů, které se, avšak časem mohou rozpadnout na mikroplasty. Dlouhodobé účinky mikroplastů na životní prostředí nejsou dosud dostatečně prozkoumány, ale jejich přítomnost vyvolává závažné otázky o ekologických i zdravotních dopadech. Proto je kladen zásadní důraz na vývoj biologicky odbouratelných hydrogelových materiálů, které se v prostředí rychleji rozloží, a tím minimalizují svou dlouhodobou perzistenci. Dosažení tohoto cíle vyžaduje další výzkumy, které by se měly zaměřit na studium chování hydrogelů v různých biotopech, potenciální akumulaci v organismech a důsledky jejich přítomnosti pro ekosystém jako celek (Zarjab et al. 2023).

3.16 Náklady na výrobu jedné tuny hydrogelu z rýžové slámy

Byly vypočítány roční výrobní náklady hydrogelu, zahrnující jak fixní, tak variabilní složky, přičemž celkové náklady byly omezeny na roční odpisovou sazbu zařízení.

Fixní náklady zahrnují:

- Roční pronájem továrny
- Spotřebu elektřiny za rok
- Spotřebu vody za rok

Variabilní náklady zahrnují:

Nákup rýžové slámy (roční objem 180 tun)

- Náklady na dopravu
- Chemické náklady potřebné k přeměně slámy na hydrogel
- Náklady na balení

Předpokladem studie byla denní spotřeba 0,5 tuny rýžové slámy s denní výrobou 9 tun, což odpovídá 3240 tunám hydrogelu ročně.

Celkové roční náklady na výrobu 3240 tun hydrogelu ze zbytků rýžové slámy činily 37 799 230 dolarů. Z toho:

- Roční variabilní náklady dosáhly 37 772,520 dolarů
- Fixní náklady činily 2 670,90 dolarů

Cena výroby jedné tuny hydrogelu činila přibližně 1166, 640 dolarů. Pokud by byla marže zisku 20 %, mohla by se tuna hydrogelu (SH) vyráběného, z rýžové slámy prodávat na lokálním trhu za 1400 dolarů. Tato cena představuje snížení o 51,3 % oproti ceně importovaného akrylamidového hydrogelu (AH), který stojí 2875,39 dolarů za tunu. Pokud by jeden feddan (4200 m²) vyžadoval 50 kg hydrogelu, náklady by činily:

- Přibližně 70,03 dolarů pro místní hydrogel (SH)
- Přibližně 172,50 dolarů pro importovaný hydrogel (AH)

Tato studie tedy ukazuje významný ekonomický potenciál výroby hydrogelu z domácí rýžové slámy v porovnání s dovozem dražších materiálů (Solieman et al. 2023)

4. Závěr

Hydrogely se ukazují jako velmi účinný nástroj pro zvýšení efektivity zemědělské produkce, zejména v suchých a polosuchých oblastech, kde pomáhají řešit nedostatek vody a degradaci půdy. Jejich schopnost zadržovat vodu, postupně ji uvolňovat a zároveň sloužit jako nosiče živin výrazně zlepšuje půdní vlastnosti, podporuje růst rostlin a zvyšuje jejich výnosy. Výsledky skleníkových experimentů, například s pěstováním kukuřice, jednoznačně ukazují pozitivní vliv přidavku hydrogelu na výšku rostlin, průměr stonku a hmotnost biomasy. U jílovitohlinité půdy došlo při koncentraci hydrogelu 0,5 % k nárůstu výšky rostlin o více než 26 %, zatímco v písčité půdě byla výška rostlin při 1% koncentraci více než dvojnásobná. Efektivita využití vody (WUE) se v písčité půdě zvýšila z 0,13 g/ml na 0,41 g/ml, což představuje více než trojnásobné zlepšení.

Další studie zaměřené na růst rajčat nebo vinné révy potvrdily, že aplikace hydrogelu zlepšuje provzdušnění půdy, zvyšuje rychlost růstu, počet listů i celkovou biomasu rostlin. Například u rajčat bylo při koncentraci 3 g/dm³ dosaženo průměrného denního přírůstku výšky 2,08 cm a nárůstu provzdušnění půdy o více než 21 %.

Polní experimenty na různých typech půd ukázaly, že aplikace hydrogelu vede k významnému zvýšení výnosů plodin – například u cukrové třtiny o 11,5 %, u manioku o téměř 50 %, a u okurek dokonce o 136 %. Při použití hydrogelu na písčitých půdách se zadržení vody zvýšilo o více než 20 % a prodloužila se dostupnost vody pro rostliny až o 30 dnů ve srovnání s neošetřenou půdou.

Kromě agronomických výhod nabízejí hydrogely i ekonomický potenciál. Studie ukázaly, že výroba hydrogelů z rýžové slámy může snížit náklady až o 51 % oproti dovozu syntetických polymerů. Cena tuny lokálně vyrobeného hydrogelu činí přibližně 1166 dolarů, zatímco cena dovozového akrylamidového hydrogelu přesahuje 2800 dolarů.

Současně je nutné brát v úvahu i environmentální rizika, jako je hromadění nerozložitelných polymerů nebo potenciální vznik mikroplastů. Tyto výzvy vedou k intenzivnímu výzkumu biologicky odbouratelných hydrogelů na bázi přírodních polymerů – škrobu, chitosanu, ligninu či alginátu – které jsou ekologicky šetrnější, a přitom si zachovávají vysokou funkčnost.

Závěrem lze konstatovat, že hydrogely představují multifunkční a udržitelný nástroj pro moderní zemědělství, který má potenciál zvýšit odolnost vůči klimatickým extrémům, zlepšit výnosy, snížit spotřebu vody i hnojiv a zároveň přispět k ochraně životního prostředí.

Literatura

- Abebe DG, Fujiwara T. 2012. Controlled thermoresponsive hydrogels by stereocomplexed PLA-PEG-PLA prepared via hybrid micelles of premixed copolymers with different PEG lengths. *Biomacromolecules*, **13**: 1828-1836
- Abobatta F. Impact of hydrogel polymer in agricultural sector. *Advances in Agriculture and Environmental Science Open Acces*, **1(2)**.
- Agaba H, Orikiriza LJ, Obua J, Kabasa JD, Worbes M, Hüttermann A. 2011. Hydrogel amendment to sandy soil reduces irrigation frequency and improves the biomass of *Agrostis stolonifera*. *Agricultural Sciences*, **2(04)** 544.
- Ahmed EM. 2015. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, **6(2)**: 105-121.
- Akay A, Sert D. 2020. The effects of whey application on the soil biological properties and plant growth. *Eurasian Journal of Soil Science*, **9(4)**: 349-355.
- Akhter J, Mahmood K, Malik KA, Mardan A, Ahmad M, Iqbal MM. 2004. Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea. *Plant Soil and Environment*, **50(10)**: 463-469.
- Albalasmeh A.A, Mohawesh O, Gharaibeh M.A, Alghamdi A.G, Alajlouni M.A, Alqudah A.M. 2022. Effect of hydrogel on corn growth, water use efficiency, and soil properties in a semi-arid region. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, **21(8)**: 518-524
- AlShrouf A. 2017. Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming. *American Scientific Research Journal Engineering Technology Scientific* **27(1)**: 247-255.
- Apriyanto A, Compart J, Fettke J. 2022. A review of starch, a unique biopolymer—Structure, metabolism and in planta modifications. *Plant Science*, **318**: 111223.
- Mehrnoosh A. 2020. A review of Polyvinyl alcohol/Carboxymethyl cellulose (PVA/CMC) composites for various applications. *Journal of Composites and Compounds*, **2.3**: 69-76.
- Baasiri M., Ryan J, Muciek M, Harik SN. 1986. Soil application of a hydrophilic conditioner in relation to moisture, irrigation frequency and crop growth. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **17(6)**: 573-589.

Bana RS, Grover M, Singh D, Bamboriya SD, Godara S, Kumar M, Satyavathi CT. 2023. Enhanced pearl millet yield stability, water use efficiency and soil microbial activity using superabsorbent polymers and crop residue recycling across diverse ecologies. *European Journal of Agronomy*, **148** 126876.

Bao Y, Ma J, Li N. 2011. Synthesis and swelling behaviors of sodium carboxymethyl cellulose-g-poly (AA-co-AM-co-AMPS)/MMT superabsorbent hydrogel. *Carbohydrate Polymers*, **84**(1): 76-82.

Bashaw R. N, Harper BG. 1966. *U.S. Patent No. 3,229,769*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Bongiorno G. 2020. *Novel soil quality indicators for the evaluation of agricultural management practices: a biological perspective*. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, **7**(3): 257

Bouranis DL, Theodoropoulos AG, Drossopoulos JB. 1995. Designing synthetic polymers as soil conditioners. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **26**(9-10): 1455-1480.

Buchmann C, Bentz J, Schaumann GE. 2015. Intrinsic and model polymer hydrogel-induced soil structural stability of a silty sand soil as affected by soil moisture dynamics. *Soil and Tillage Research*, **154**: 22-33.

Cai TQ, Ren N, Jin L, Cheng K, Kash S, Chen R, Waters MG. 2008. Role of GPR81 in lactate-mediated reduction of adipose lipolysis. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, **377**(3): 987-991.

Campo M, Esteller M.V, Morell I, Expósito J.L, Bandenay G.L, Díaz-Delgado C. 2019. A lysimeter study under field conditions of nitrogen and phosphorus leaching in a turf grass crop amended with peat and hydrogel. *Science of the Total Environment*, **648**: 530-541.

De Loos M, Feringa BL, van Esch JH. 2005. Design and application of self-assembled low molecular weight hydrogels. *European Journal of Organic Chemistry*, **(17)**: 3615-3631.

Dias E, Concalves C.J.S, Barbosa G, Dutra A.F, Barboza C.R.A, Barros P.E.de.O, Assuncao D, Brioza M.E.O. 2024. Hydrogel application alters physical and chemical properties of soil, reducing fertirrigation needs in tomato crop. *Scientia Horticulturae*, **334**.

Durpekova S, Di Martino A, Dusankova M, Drohsler P, Sedlarik V. 2021. Biopolymer hydrogel based on acid whey and cellulose derivatives for enhancement water retention capacity of soil and slow release of fertilizers. *Polymers*, **13**(19): 3274.

Durpekova S, Filatova K, Cisar J, Ronzova A, Kutalkova E, Sedlarik V. 2020. A novel hydrogel based on renewable materials for agricultural application. *International Journal of Polymer Science*, **(1)**: 8363418.

Ekebafé LO, Ogbeifun DE, Okieimen FE. 2011. Effect of native cassava starch-poly (sodium acrylate-co-acrylamide) hydrogel on the growth performance of maize (*Zea mays*) seedlings. *American Journal Polymer Science*, **1(1)**: 6-11.

El-Asmar J, Jaafar H, Bashour I, Farran MT, Saoud IP. 2017. Hydrogel banding improves plant growth, survival, and water use efficiency in two calcareous soils. *CLEAN–Soil, Air, Water*, **45(7)**: 1700251.

Elbarbary Ahmed M. 2017. Radiation induced crosslinking of polyacrylamide incorporated low molecular weights natural polymers for possible use in the agricultural applications. *Carbohydrate Polymers*, **176**: 19-28.

Elbarbary, Ahmed M. Radiation induced crosslinking of polyacrylamide incorporated low molecular weights natural polymers for possible use in the agricultural applications. *Carbohydrate polymers*, 2017, **176**: 19-28.

El-Kady AFY, Borham TI. 2013. Improving the sandy soil physical properties and *Conocarpus erectus* L. seedlings growth by the application of hydrogel.

Fekete T, Borsa J, Takács E, Wojnárovits L. 2017. Synthesis of carboxymethylcellulose/starch superabsorbent hydrogels by gamma-irradiation. *Chemistry Central Journal*, **11**: 1-10.

Frioni T, Bonicelli P.G, Ripa C, Tombesi S, Poni S. 2024. Superabsorbent hydrogels: A new tool for vineyard water management. *Agricultural Water Management*, **306**.

Gebre MG, Earl HJ. 2021. Soil water deficit and fertilizer placement effects on root biomass distribution, soil water extraction, water use, yield, and yield components of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] grown in 1-m rooting columns. *Frontiers in Plant Science*, **12**: 581127.

Gehring JM., Lewis AI. 1980. Effect of hydrogel on wilting and moisture stress of bedding plants. *Journal of the American Society for Horticulture Science*, **105(4)**: 511-513

Ghobashy MM. 2020. Hydrogels based on natural polymers, **1(01)**: 329-356

Chen H. 2018. Metal based nanoparticles in agricultural system: behavior, transport, and interaction with plants. *Chemical Speciation & Bioavailability*, **30(1)**: 123-134.

Cheng D, Liu Y, Yang G, Hao G, Wang Y, Zhang A. 2017. Preparation of low cost superabsorbent hydrogel by urea and acrylic acid. *Materials Letters*, **204**: 16-18.

Cheng L, Cai Z, Ye T, Yu X, Chen Z, Yan Y, Deng L. 2020. Injectable polypeptide-protein hydrogels for promoting infected wound healing. *Advanced Functional Materials*, **30(25)**: 2001196.

CHenng D. 2018. Water-and fertilizer-integrated hydrogel derived from the polymerization of acrylic acid and urea as a slow-release N fertilizer and water retention in agriculture. *Journal of agricultural and food chemistry*, **66.23**: 5762-5769.

Idrissi A.E, Channab B. Essamlali Y, Zahouily M. 2024. Superabsorbent hydrogels based on natural polysaccharides: Classification, synthesis, physicochemical properties, and agronomic efficacy under abiotic stress conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, **258(2)**.

Idumah CI, Nwuzor IC, Odera RS. 2021. Recent advances in polymer hydrogel nanoarchitectures and applications. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, **4**: 100143.

Jahan M, Nassiri Mahallati M. 2020. Can superabsorbent polymers improve plants production in arid regions?. *Advances in Polymer Technology*, **(1)**: 7124394.

Katchalsky A, Lifson S, Exsenberg H. 1951. Equation of swelling for polyelectrolyte gels. *Journal of Polymer Science* **7(5)**: 571-574.

Katiyar D, Hemantaranjan A, Singh B. 2015. Chitosan as a promising natural compound to enhance potential physiological responses in plant: a review. *Indian Journal of Plant Physiology*, **20**: 1-9.

Kesharwani P, Bisht A, Alexander A, Dave V, Sharma S. 2021. Biomedical applications of hydrogels in drug delivery system: An update. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, **66**: 102914.

Ketterings Q, Czymmek K, Gami S, Godwin G, Ganoe K. 2017. Guidelines for land application of acid whey. *Department of Animal Science Publication Series*, **247**.

Lenka S, Lenka NK, Singh AB, Singh B, Raghuwanshi J. 2017. Global warming potential and greenhouse gas emission under different soil nutrient management practices in soybean–wheat system of central India. *Environmental Science and Pollution Research*, **24**: 4603-4612.

Lertsarawut P, Rattanawongwiboon T, Tangthong T, Laksee S, Kwamman T, Phuttharak B, Hemvichian K. 2021. Starch-based super water absorbent: A promising and sustainable way to increase survival rate of trees planted in arid areas. *Polymers*, **13(8)**: 1314.

Li X, Li Q, Xu X, Su Y, Yue Q, Gao B. 2016. Characterization, swelling and slow-release properties of a new controlled release fertilizer based on wheat straw cellulose hydrogel. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **60**: 564-572.

Linden VD, Heiko J. Stimulus-sensitive hydrogels and their applications in chemical (micro) analysis. *Analyst*, 2003, **128(4)**: 325-331.

Liu G, Ding Z, Yuan Q, Xie H, Gu Z. 2018. Multi-layered hydrogels for biomedical applications. *Frontiers in Chemistry*, **6**: 439.

Liu Y, Wang J, Chen H, Cheng D. 2022. Environmentally friendly hydrogel: A review of classification, preparation and application in agriculture. *Science of the Total Environment*, **846**.

Ma J, Li X, Bao Y. 2015. Advances in cellulose-based superabsorbent hydrogels. *RSC Advances*, **5(73)**: 59745-59757.

Ma L, Shi Y, Siemianowski O, Yuan B, Egner TK, Mirnezami SV, Cademartiri L. 2019. Hydrogel-based transparent soils for root phenotyping in vivo. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116(22)**: 11063-11068.

Duarteet M, Grijalva Contreras RL, Robles Contreras F, López Carvajal A, Núñez Ramírez F. 2019. Irrigation deficit and hydrogel application in olive productivity in desert regions. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, **10(2)**: 393-404.

Mahil EIT, Kumar BA. 2019. Foliar application of nanofertilizers in agricultural crops—A review. *J. Farm Sci*, **32(3)**: 239-249.

Merino C, Kuzyakov Y, Godoy K, Cornejo P, Matus F. 2020. Synergy effect of peroxidase enzymes and Fenton reactions greatly increase the anaerobic oxidation of soil organic matter. *Scientific Reports*, **10(1)**: 11289.

Miyamoto T, Dexter ST. 1960. Acceleration of early growth of sugar beet seedlings by coating of seedballs with hydrophilic colloids and nutrients 1. *Agronomy Journal*, **52(5)**: 269-271.

Mohawesh O, Durner W. 2019. Effects of bentonite, hydrogel and biochar amendments on soil hydraulic properties from saturation to oven dryness. *Pedosphere*, **29**: 598-607.

Montesano FF, Parente A, Santamaria P, Sannino A, Serio F. 2015. Biodegradable superabsorbent hydrogel increases water retention properties of growing media and plant growth. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, **4**: 451-458.

Moreau D, Chauvet C, Etienne F, Rannou FP, Corté L. 2016. Hydrogel films and coatings by swelling-induced gelation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **113**(47): 13295-13300.

Neethu TM, Dubey PK, Kaswala AR. 2018. Prospects and applications of hydrogel technology in agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, **7**(5): 3155-3162.

Olad A (a), Zebhi H, Salari D, Mirmohseni A, Reyhanitabar A. 2018. Synthesis, characterization, and swelling kinetic study of porous superabsorbent hydrogel nanocomposite based on sulfonated carboxymethylcellulose and silica nanoparticles. *Journal of Porous Materials*, **25**: 1325-1335.

Olad A (b), Zebhi H, Salari D, Mirmohseni A, Tabar AR. 2018. Slow-release NPK fertilizer encapsulated by carboxymethyl cellulose-based nanocomposite with the function of water retention in soil. *Materials Science and Engineering*: **90**: 333-340.

Omidian H, Hashemi SA, Sammes PG, Meldrum I. 1999. Modified acrylic-based superabsorbent polymers (dependence on particle size and salinity). *Polymer*, **40**(7): 1753-1761.

Onyelowe KC, Okafor FO. 2015. Review of the synthesis of nano-sized ash from local waste for use as admixture or filler in engineering soil stabilization and concrete production. *Journal of Environmental Nanotechnol*, **4**(4): 23-27.

Pathak V. 2018. *Effect of Starch-based Hydrogel on Early Growth of Corn* (Master's thesis, Purdue University).

Patra SK, Poddar R, Brestic M, Acharjee PU, Bhattacharya P, Sengupta S, Hossain A. 2022. Prospects of hydrogels in agriculture for enhancing crop and water productivity under water deficit condition. *International Journal of Polymer Science*, **(1)**: 4914836.

Pellá MC, Lima-Tenório MK, Tenório-Neto ET, Guilherme MR, Muniz EC, Rubira AF. 2018. Chitosan-based hydrogels: From preparation to biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, **196**: 233-245.

Po R. 1994. Water-absorbent polymers: a patent survey. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, **34(4)**: 607-662.

Pradeep M, Senthilkumar S, Kumar AR, Manivannan S. 2023. Essentiality and role of Hydrogel Technologies in commercial horticulture production. *Water and Energy International*, **66(1)**: 15-18.

Qiao D, Liu H, Yu L, Bao X, Simon GP, Petinakis E, Chen L. 2016. Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by starch-based superabsorbent polymer. *Carbohydrate Polymers*, **147**: 146-154.

Qin Ch, Wang H, Zhao Y, Oi Y, Wu N, Zhang S, Xu W. 2024. Recent advances of hydrogel in agriculture: Synthesis, mechanism, properties and applications. *European Polymer Journal*, **219**.

Radwan MA, Al-Sweasy OH, Elazab HA. 2017. Preparation of hydrogel based on acryl amide and investigation of different factors affecting rate and amount of absorbed water. *Agricultural Sciences*, **8(02)**: 161.

Rashidzadeh A, Olad A, Reyhanitabar A. 2015. Hydrogel/clinoptilolite nanocomposite-coated fertilizer: swelling, water-retention and slow-release fertilizer properties. *Polymer Bulletin*, **72**: 2667-2684.

Rehman A, Ahmad R, Safdar M. 2011. Effect of hydrogel on the performance of aerobic rice sown under different techniques. *Plant, Soil and Environment*, **57(7)**: 321-325

Reyes Z., Clark, CF., Dreier F., Phillips RC., Russell CR., Rist CE. 1973. Continuous production of acrylonitrile-starch graft copolymers by ceric ion catalysis. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, **12(1)**: 62-67.

Rizwan M, Gilani S.R, Durani A.I, Naseem S. 2021. Materials diversity of hydrogel: Synthesis, polymerization process and soil conditioning properties in agricultural field. *Journal of Advanced Research*, **33**: 15-40.

Rozo G, Bohorques L, Santamaría J. 2019. Controlled release fertilizer encapsulated by a κ -carrageenan hydrogel. *Polímeros*, **29(3)**: e2019033.

Rudzinski WE, Dave AM, Vaishnav UH, Kumbar SG, Kulkarni AR, Aminabhavi TM. 2002. Hydrogels as controlled release devices in agriculture. *Designed Monomers and Polymers*, **5(1)**: 39-65.

Sadeghi M, Soleimani F. 2012. Synthesis of pH-sensitive hydrogel based on starch-polyacrylate superabsorbent. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, **03(02)**

Saha, Biplob KA. 2019. Slow release brown coal-urea fertiliser reduced gaseous N loss from soil and increased silver beet yield and N uptake. *Science of The Total Environment*, **649**: 793-800.

Sachin TM, Thakur N, Sharma P. 2020. Use of alternative growing media in ornamental plants. *International Journal of Chemical Studies*, **8(6)**: 188-194.

Sailaja A. K, Amareshwar P, Chakravarty P. 2011. Different techniques used for the preparation of nanoparticles using natural polymers and their application. *International Journal Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, **3(2)**: 45-50.

Satriani A, Catalano M, Scalcione E. 2018. The role of superabsorbent hydrogel in bean crop cultivation under deficit irrigation conditions: A case-study in Southern Italy. *Agricultural Water Management*, **195**: 114-119.

Savi T, Andri S, Nardini A. 2013. Impact of different green roof layering on plant water status and drought survival. *Ecological Engineering*, **57**: 188-196.

Savi T, Marin M, Boldrin D, Incerti G, Andri S, Nardini A. 2014. Green roofs for a drier world: Effects of hydrogel amendment on substrate and plant water status. *Science of the Total Environment*, **490**: 467-476.

Shahid SA, Qidwai AA, Anwar F, Ulla I, Rashid U. 2012. Improvement in the water retention characteristics of sandy loam soil using a newly synthesized poly (acrylamide-co-acrylic acid)/AlZnFe₂O₄ superabsorbent hydrogel nanocomposite material. *Molecules*, **17(8)**: 9397-9412.

Shaviv A, Raban S, Zaidel E. 2003. Modeling controlled nutrient release from polymer coated fertilizers: Diffusion release from single granules. *Environmental Science & Technology*, **37(10)**: 2251-2256.

Souza AJDJ, Guimarães RJ, Colombo A, Sant'Ana JADV, Castanheira DT. 2016. Quantitative analysis of growth in coffee plants cultivated with a water-retaining polymer in an irrigated system1. *Revista Ciência Agronômica*, **47(1)**: 162-171.

Soliman NY, Afifi MMI, Abu-elMagd E, Baker NA, Ibrahim MM. 2023. Hydro- physical, biological and economic study on simply, an environment – friendly and valuable rice straw-based hydrogel production. *Industrial Crops and Products*, **201**.

Sun D, Hussain HI, Yi Z, Siegele R, Cresswell T, Kong L, Cahill DM. 2014. Uptake and cellular distribution, in four plant species, of fluorescently labeled mesoporous silica nanoparticles. *Plant Cell Reports*, **33**: 1389-1402.

Sutton CH. Adhesions and their prevention. *The Obstetrician & Gynaecologist*, 2005, **7.3**: 168-176.

Tariq Z, Iqbal D.N, Rizwan M, Ahmad M, Faheem M, Ahmed M. 2023. Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: a review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding. *RSC Advances*, **13(35)**: 24731-24754.

Terry LA, Joyce, DC. 2004. Elicitors of induced disease resistance in postharvest horticultural crops: a brief review. *Postharvest Biology and Technology*, **32(1)**: 1-13.

Tomadoni B, Casalongué C, Alvarez VA. 2019. Biopolymer-based hydrogels for agriculture applications: Swelling behavior and slow release of agrochemicals. *Polymers for Agri-food Applications*, 99-125.

Voorhaar L, Hoogenboom R. 2016. Supramolecular polymer networks: hydrogels and bulk materials. *Chemical Society Reviews*, **45(14)**: 4013-4031.

Wang R, Chi W, Wan F, Wei J, Ping H, Zou Z, Fu Z. 2022. Nanocage ferritin reinforced polyacrylamide hydrogel for wearable flexible strain sensors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **14(18)**: 21278-21286.

Wei H, Wang H, Chu H, Li J. 2019. Preparation and characterization of slow-release and water-retention fertilizer based on starch and halloysite. *International Journal of Biological Macromolecules*, **133**: 1210-1218.

Wen, Peng. 2017 Microwave-assisted synthesis of a novel biochar-based slow-release nitrogen fertilizer with enhanced water-retention capacity. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **5(8)**: 7374-7382.

Witono JR, Noordergraaf I, Heeres HJ, Janssen LPBM. 2014. Water absorption, retention and the swelling characteristics of cassava starch grafted with polyacrylic acid. *Carbohydrate Polymers*, **103**: 325-332.

Wróblewska K. 2019. Impact of mulching on growth essential oil composition and its biological activity in *Monarda didyma* L. *Industrial Crops and Products*, **129**: 299-308.

Yazdani F, Allahdadi I, Akbari GA. 2007. Impact of superabsorbent polymer on yield and growth analysis of soybean (*Glycine max* L.) under drought stress condition. *Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS*, **10(23)**: 4190-4196.

Yom-tov, Ortal A. 2014 novel design of injectable porous hydrogels with in situ pore formation. *Acta Biomaterialia*, **10(10)**: 4236-4246.

Zarjab, T. 2023. Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: a review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding, **13(35)**.

Zhang JP, Li A, Wang AQ. 2005. Study on superabsorbent composite. V. Synthesis, swelling behaviors and application of poly (acrylic acid-co-acrylamide)/sodium humate/attapulgit superabsorbent composite. *Polymers for Advanced Technologies*, **16(11-12)**: 813-820.

Zhang XN, Wang YJ, Sun S, Hou L, Wu P, Wu ZL, Zheng Q. 2018. A tough and stiff hydrogel with tunable water content and mechanical properties based on the synergistic effect of hydrogen bonding and hydrophobic interaction. *Macromolecules*, **51(20)**: 8136-8146.

Zheng H, Mei P, Wang W, Yin Y, L H, Zheng M, Cui Z. 2023(a). Effects of super absorbent polymer on crop yield, water productivity and soil properties: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*, **282**: 108290.

Zheng L, Seidi F, Wu W, Pan Y, Xiao H. 2023(b). Dual-functional lignin-based hydrogels for sustained release of agrochemicals and heavy metal ion complexation. *International Journal of Biological Macromolecules*, **235**: 123701.