



Cikel zrelosti tehnologij: od ideje do preverjene uporabe

Ko inženir razvija novo tehnologijo, ni dovolj vedeti, ali je rešitev *tehnično mogoča*. Pomembno je tudi, kako daleč je razvoj napredoval, v kakšnem okolju je bila rešitev preverjena in ali jo je mogoče zanesljivo uporabljati v praksi. Cikel zrelosti tehnologij oziroma *Technology Readiness Level* – TRL je okvir, ki to razvojno pot opisuje z devetimi stopnjami, od opaženih osnovnih načel do uspešne uporabe v dejanskem okolju. ^[1]

TRL je predvsem orodje za ocenjevanje **tehnoške zrelosti**, ne pa splošne kakovosti, ekonomske uspešnosti ali pripravljenosti izdelka za trg.

Kaj je TRL?

TRL je lestvica od 1 do 9:

Stopnja	Pomen	Tipičen dokaz
TRL 1	Osnovna načela so opažena in opisana	Znanstvena spoznanja, meritve ali objava
TRL 2	Tehnološki koncept ali možna uporaba sta oblikovana	Opis koncepta, zahtev in predvidene uporabe
TRL 3	Dokaz koncepta	Analitični izračuni in laboratorijski poskusi potrjujejo ključne funkcije
TRL 4	Komponenta ali prototip je potrjen v laboratoriju	Delujoč laboratorijski prototip ali preskusna naprava
TRL 5	Tehnologija je potrjena v relevantnem okolju	Preskus v okolju, ki dovolj dobro posnema dejanske pogoje
TRL 6	Prototip je demonstriran v relevantnem okolju	Integriran prototip z reprezentativnimi podatki in obremenitvami
TRL 7	Prototip sistema deluje v operativnem okolju	Demonstracija v dejanskem ali skoraj dejanskem okolju
TRL 8	Sistem je dokončan in kvalificiran	Končna konfiguracija, zaključena verifikacija in validacija
TRL 9	Sistem je dokazan v dejanski uporabi	Uspešno delovanje med rednim obratovanjem

Ta razdelitev izhaja iz pristopa, ki ga je razvila NASA, pozneje pa je bil standardiziran tudi v okviru ISO 16290, prvotno za vesoljske sisteme. Opredelitve se danes uporabljajo tudi na številnih drugih področjih, vendar jih je treba prilagoditi konkretnemu sektorju in uporabi. ^[2]

^[3]

Tri razvojna obdobja

Devet stopenj lahko za praktično uporabo združimo v tri večje skupine.

1. Raziskovanje in dokazovanje koncepta: TRL 1–3

Na začetku inženir še ne razvija nujno končnega izdelka. Raziskuje fizikalna načela, oblikuje koncept in preverja, ali je ključna funkcija sploh izvedljiva.

Primeri vprašanj:

- Kateri fizikalni, kemijski ali biološki pojav omogoča rešitev?
- Ali je predlagani mehanizem skladen z izračuni?
- Kateri parametri so za delovanje odločilni?
- Ali je mogoče ključne lastnosti izmeriti?
- Katere predpostavke so še nepreverjene?

Pri TRL 3 je pomembno, da dokaz koncepta potrdi **kritično funkcijo**, ne le tega, da prototip na videz deluje. Če je na primer cilj razviti nov material za zaščito betonske konstrukcije, ni dovolj pokazati, da se material lahko pripravi. Preveriti je treba tudi, ali zagotavlja zahtevano odpornost proti abraziji, zmrzovanju, kemičnim vplivom ali drugim relevantnim obremenitvam.

2. Razvoj in validacija prototipa: TRL 4–6

V tej fazi se tehnologija premika iz laboratorija proti stvarnim pogojem. Posamezne komponente se povezujejo v sistem, prototip postaja reprezentativen, preskusi pa morajo zajeti realne obremenitve, vmesnike in okoljske vplive.

Ključna razlika je med:

- **laboratorijskim okoljem**, kjer so pogoji nadzorovani;
- **relevantnim okoljem**, ki dovolj realistično predstavlja predvideno uporabo;
- **operativnim okoljem**, kjer tehnologija deluje v dejanskem sistemu in z resničnimi uporabniki, postopki ter omejitvami.

Pri TRL 5 in TRL 6 mora inženir posebej preveriti, ali je prototip res primerljiv s končnim sistemom. Pogosta napaka je, da se kot dokaz zrelosti uporabi majhen laboratorijski vzorec, čeprav se bo končna tehnologija uporabljala v drugačnem merilu, z drugačnimi materiali, obremenitvami ali pogoji vzdrževanja.

3. Demonstracija in uvedba: TRL 7–9

Pri TRL 7 se prototip preskuša v operativnem okolju. To je pogosto najtežji prehod, saj se v praksi pojavijo dejavniki, ki jih laboratorij ni zajel: nihanje temperatur, nepredvidljivi dogodki, uporabniške napake, omejitve prostora, zahteve vzdrževanja, dobavne težave in povezovanje z obstoječo infrastrukturo.

TRL 8 pomeni, da je sistem dokončan, integriran in kvalificiran za predvideno uporabo. Pri TRL 9 pa je tehnologija že **dokazana med dejanskim obratovanjem**. To ne pomeni samo, da je bila enkrat uspešno prikazana, ampak da obstajajo ponovljivi dokazi o zanesljivem delovanju v realnih razmerah. NASA pri tej stopnji poudarja tudi dokončano dokumentacijo, podporo med obratovanjem in dejanske operativne rezultate. ^[1]

Kaj mora inženir razumeti?

1. TRL se nanaša na določeno tehnologijo in uporabo

Ni pravilno reči, da je »podjetje na TRL 7« ali da je »raziskovalno področje na TRL 5«. Ocena se nanaša na jasno opredeljen tehnološki element, konfiguracijo in predvideno uporabo.

Ista tehnologija ima lahko različne TRL-je:

- TRL 6 za laboratorijski proces;
- TRL 4 za vključitev v velik industrijski sistem;
- TRL 3 za uporabo v povsem drugem okoljskem ali obratovalnem režimu.

Zato mora biti pri vsaki oceni navedeno:

1. kaj se ocenjuje;
2. za katero uporabo;
3. v katerem okolju;
4. na kateri konfiguraciji;
5. na podlagi katerih dokazov.

2. TRL ni isto kot pripravljenost za trg

Visok TRL še ne zagotavlja komercialnega uspeha. Tehnologija je lahko tehnično zrela, vendar:

- predraga za proizvodnjo;
- težko dobavljiva;
- zahtevna za vgradnjo ali vzdrževanje;
- brez ustreznih standardov;
- pravno ali okoljsko nesprejemljiva;
- nezdržljiva z obstoječo infrastrukturo;
- brez uporabnikov ali poslovnega modela.

Zato je koristno TRL dopolniti z drugimi vidiki zrelosti:

Vidik	Osrednje vprašanje
Tehnološka zrelost	Ali rešitev deluje?
Proizvodna zrelost	Ali jo je mogoče izdelovati v zahtevanem obsegu in kakovosti?

Vidik	Osrednje vprašanje
Tržna zrelost	Ali obstaja uporabnik, trg in pripravljenost plačila?
Regulativna zrelost	Ali so izpolnjene zakonske in standardizacijske zahteve?
Organizacijska zrelost	Ali ima organizacija ljudi, postopke in znanje za uporabo?
Okoljska zrelost	Kakšni so vplivi v celotnem življenjskem ciklu?

TRL torej odgovarja predvsem na vprašanje: **Kako dobro je tehnologija tehnično dokazana?**

3. Ključni dokaz ni demonstracija, temveč izpolnitev meril

Za vsako stopnjo mora inženir vnaprej določiti tako imenovana **izstopna merila**. To so preverljivi pogoji, ki morajo biti izpolnjeni za prehod na naslednjo stopnjo.

Namesto trditve:

»Prototip je uspešen.«

je bolje zapisati:

»Prototip je pri temperaturah od -20 do 40 °C, pri predpisanih obremenitvah in po 1.000 ciklih delovanja dosegel najmanj 95% zahtevane učinkovitosti, brez kritičnih odpovedi.«

Dobro izstopno merilo vključuje:

- merljiv parameter;
- dovoljeno območje ali mejno vrednost;
- preskusno metodo;
- okolje preskušanja;
- trajanje ali število ciklov;
- kriterij uspeha;
- način dokumentiranja.

Pri ocenjevanju TRL so zato pomembnejši **sledljivi podatki** kot promocijske oznake, kot so »pilotno«, »napredno«, »revolucionarno« ali »industrijsko pripravljeno«.

4. Prehod med stopnjami zahteva zmanjševanje tveganj

Razvoj tehnologije ni linearna pot, pri kateri se samo dodajajo funkcije. Vsaka višja stopnja razkrije nove vrste tveganj.

Na nižjih stopnjah prevladujejo vprašanja fizikalne izvedljivosti:

- Ali mehanizem deluje?
- Ali je mogoče doseči zahtevane lastnosti?

Na srednjih stopnjah se pojavijo sistemska tveganja:

- Ali se komponente med seboj pravilno povezujejo?
- Ali prototip deluje pri realnih obremenitvah?
- Ali je mogoče zagotoviti ponovljivost?

Na višjih stopnjah postanejo pomembna obratovalna in organizacijska tveganja:

- Kaj se zgodi ob okvari?
- Kako poteka vzdrževanje?
- Ali lahko tehnologijo uporabljajo usposobljeni uporabniki?
- Ali so rezervni deli, meritve in servis dolgoročno zagotovljeni?

Kako naj inženir vodi razvoj?

Praktičen pristop je mogoče oblikovati v sedmih korakih.

1. Opredeli tehnološki element

Ne ocenjuj celotnega projekta z eno številko. Ločeno opredeli na primer:

- material;
- senzor;
- programski algoritem;
- proizvodni postopek;
- konstrukcijski sklop;
- integrirani sistem.

Celoten sistem je lahko omejen z najnižjim TRL-jem svoje kritične komponente.

2. Določi predvideno uporabo in okolje

Zapiši, ali bo tehnologija delovala v laboratoriju, na gradbišču, v vodnem toku, na prostem, v industrijskem obratu ali v kritični infrastrukturi. »Relevantno okolje« ni abstrakten pojem; določiti ga je treba glede na dejanske vplive.

Pri vodnogospodarski tehnologiji bi to lahko pomenilo kombinacijo:

- hidroloških in hidravličnih obremenitev;
- suspendiranega in plavinskega materiala;
- temperaturnih sprememb;
- zmrzovanja in odtajanja;
- dostopnosti za vzdrževanje;
- zahtev glede varnosti in neprekinjenega delovanja.

3. Določi ključne funkcije

Vprašaj se, brez katerih funkcij tehnologija ne izpolni svojega namena. Te funkcije morajo biti merljive.

Primeri:

- nosilnost;
- natančnost;
- prepustnost;
- odpornost proti obrabi;
- energetska učinkovitost;
- odzivni čas;
- razpoložljivost;
- življenjska doba.

4. Pripravi načrt dokazovanja

Za vsak TRL opredeli:

- preskus;
- vhodne pogoje;
- merilno opremo;
- podatke, ki jih boš zbral;
- kriterij uspeha;
- odgovornost za presojo.

Preskus naj bo načrtovan tako, da omogoča primerjavo z zahtevami končnega sistema, ne samo s prejšnjo različico prototipa.

5. Upoštevaj merilo in integracijo

Rezultati na majhnem vzorcu ali v kratkotrajnem poskusu pogosto ne napovedujejo zanesljivo obnašanja v velikem sistemu in skozi celotno življenjsko dobo.

Zato je treba postopoma preverjati:

- povečanje geometrijskega merila;
- proizvodno ponovljivost;
- povezavo z drugimi komponentami;
- obratovanje v različnih režimih;
- odpornost proti okvaram;
- vpliv staranja in vzdrževanja.

6. Dokumentiraj negotovosti

Ocena TRL naj ne prikriva neznank. Poleg dosežene stopnje navedi:

- katere funkcije so bile dokazane;
- katere še niso bile preverjene;
- v katerem okolju je bil izveden preskus;
- kakšne so bile omejitve;
- kateri rezultati temeljijo na modeliranju;
- katera tveganja ostajajo odprta.

Pri tem je koristno razlikovati med **dokazano**, **verjetno** in **nepreverjeno** lastnostjo.

7. Ne preskoči demonstracije v realnih pogojih

Največja vrzel med raziskavo in uporabo se pogosto pojavi pri prehodu iz TRL 6 v TRL 7. Tehnologija je lahko uspešna v relevantnem okolju, vendar še vedno ni pripravljena na dejansko uporabo v celotnem sistemu.

Za prehod je običajno potreben pilotni projekt, pri katerem se preverijo tudi:

- postopki vgradnje;
- usposabljanje uporabnikov;
- varnost;
- vzdrževanje;
- dobava materialov in delov;
- ravnanje ob izrednih dogodkih;
- združljivost z dovoljenji, standardi in predpisi.

Primer: nova tehnologija za vodnogospodarski objekt

Predstavljajmo si nov kompozitni material za zaščito površin na objektu, kjer zaradi pretoka in sedimenta prihaja do abrazije.

- TRL 2: opredeljen je koncept materiala in predviden mehanizem povečane odpornosti.
- TRL 3: laboratorijski preskusi pokažejo, da material doseže zahtevano trdnost in odpornost na abrazijo.
- TRL 4: izdelan je reprezentativen vzorec in preverjena njegova združljivost s podlago.
- TRL 5: material je preizkušen pri realističnih hitrostih toka, temperaturah in koncentracijah sedimenta.
- TRL 6: izdelan je večji prototip in preizkušen v preskusnem odseku z merljivim pretokom.
- TRL 7: material je vgrajen v del dejanskega objekta in spremljan v celotni hidrološki sezoni.

- **TRL 8:** določeni so končni postopki proizvodnje, vgradnje, kontrole kakovosti in vzdrževanja.
- **TRL 9:** rešitev je večkrat uspešno uporabljena v dejanskih objektih in ima dokumentirane obratovalne rezultate.

Pomembno je, da odpornost materiala v laboratoriju še ne pomeni, da bo rešitev dolgoročno uspešna v naravnem vodotoku. V realnih pogojih lahko rezultat spremenijo neenakomerni tok, udarci plavin, sedimentacija, biološka obraščenost, poškodbe podlage ali težavnejši dostop za popravila.

Najpogostejše napake

- **Zamenjava laboratorijskega uspeha za tehnološko zrelost.** Delovanje v idealnih razmerah še ni dokaz delovanja v praksi.
- **Uporaba ene številke brez konteksta.** TRL mora biti vedno povezan z določeno uporabo, konfiguracijo in okoljem.
- **Prehitro zviševanje ocene.** Pilotni prikaz še ne pomeni, da je končni sistem kvalificiran.
- **Spregled integracije.** Posamezna komponenta je lahko zrela, celoten sistem pa ne.
- **Neupoštevanje življenjskega cikla.** Pomembni so tudi proizvodnja, vgradnja, vzdrževanje, popravila, razgradnja in recikliranje.
- **Pomanjkanje neodvisne presoje.** Ocena, ki jo pripravi samo razvojna skupina, je lahko preveč optimistična.
- **Mešanje TRL z drugimi merili.** Visok TRL ne dokazuje finančne upravičenosti, regulativne skladnosti ali okoljskih koristi.

Sklep za inženirsko prakso

Cikel zrelosti tehnologij je predvsem jezik za **strukturirano razpravo o dokazih, tveganjih in naslednjih razvojnih korakih**. Inženirju pomaga odgovoriti na tri bistvena vprašanja:

1. Kaj je bilo do zdaj dokazano?
2. V kakšnih pogojih je bilo dokazano?
3. Kaj mora biti še preverjeno, preden je tehnologija primerna za naslednjo stopnjo?

Najboljša uporaba TRL ni v tem, da se projektu čim prej pripiše visoka številka, temveč v tem, da se za vsako naslednjo stopnjo določi jasen, merljiv in neodvisno preverljiv dokaz. Pri razvoju novih tehnologij zato velja preprosto načelo: **ne ocenjuj obljube tehnologije, ampak kakovost dokazov o njenem delovanju v vse bolj realnih pogojih.**



1. <https://esto.nasa.gov/trl/>
2. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205003605/downloads/SP-20205003605_TRA_BP_Guide_FINAL.pdf
3. <https://dgsm.gso.org.sa/store/standards/GSO:742097?lang=en>

4. <https://www.sis.se/en/produkter/aircraft-and-space-vehicle-engineering/space-systems-and-operations/ss-en-16603-11-2019/>
5. <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-iso-16290/257081734>
6. <https://www.evs.ee/en/iso-16290-2013>
7. https://www.finep.gov.br/images/chamadas-publicas/2022/15_07_2022_EL_Anexo_7-Definicao_do_Nivel_de_Maturidade_Tecnologica.pdf
8. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/9abd48b9-a44b-425b-b57d-49f33f6702ee/iso-16290-2013>
9. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/79cd9688-697a-4689-8d17-f072fd805e31/en-16603-11-2019>
10. https://esto.nasa.gov/files/TRL_definitions_AIST.pdf
11. <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>
12. <https://ecss.nl/wp-content/uploads/standards/ecss-e/ECSS-E-AS-11C1October2014.pdf>
13. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/249072ec-92a9-11f0-97c8-01aa75ed71a1/language-en>
14. <https://onderzoektips.ugent.be/en/bozi/LUYWL8mBwpkzbkhPXLDb4o/>
15. <https://www.dinmedia.de/en/standard/din-iso-16290/257081734>