

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Испитивање машинских конструкција

Број индекса: 323/2012

Марко М. Делић

**Теоријске основе Тагучијевих метода са
примером практичне примене**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Добривоје Ћатић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог рада кандидат треба да представи теоријске основе Тагучијевих метода. Потребно је изложити Тагучијев рад и објаснити најважније аспекте метода као што су: функција губитка квалитета, робусност, однос сигнал – бука и ортогоналне матрице. После теоријског дела треба применити методу и статистички обрадити резултате добијене испитивањем на затезање.

Препоручена литература:

- [1] Gunter B., A Perspective on the Taguchi Methods, Quality Progress, June 1987.
- [2] Lawrence P.S., The power of Taguchi Methods, Quality progress, January 1987.
- [3] Јовановић М., Лазић В., Адамовић Д., Ратковић Н., Машински материјали, Машински факултет, Крагујевац, 2003.

Крагујевац, 10. 03. 2014.

ментор:

Др Добривоје Ћатић, ред. проф.

РЕЗИМЕ

У оквиру рада извршено је прикупљање, систематизација и анализа знања везаних за Тагучијеве методе. Описан је Тагучијев рад, а затим су објашњене теоријске основе метода са посебним освртом на њихове најважније делове, као што су: функција губитка квалитета, робусност, ортогоналне матрице и однос сигнал – бука (S/N).

У експерименталном делу извршено је испитивање на затезање епрувета стандардног облика и одређене су механичке особине полиетилена GC 7260. Приказан је начин примене Тагучијевих метода и статистички је одређен утицај температуре, брзине кидања и деловања воде на напон на граници течења. Тиме је на практичан начин приказана употреба ортогоналних матрица и односа сигнал – бука.

Анализом резултата добијених испитивањем утврђено је да највећи утицај на напон на граници течења има температура, а најмањи деловање воде.

Кључне речи: Тагучијеве методе, функција губитка квалитета, робусност, ортогоналне матрице, однос сигнал – бука.

ABSTRACT

Data collection, analysis and systematization of knowledge related to Taguchi's methods are given in this work. Taguchi's work is described, and the theoretical basis of methods are explained, with special emphasis on their main components, such as the quality loss function, robustness, orthogonal arrays and the signal – noise ratio (S/N).

In the experimental part, investigation on straining of the tensile test tubes of standard form was made and some mechanical properties of polyethylene GC 7260 were determined. A method of application of Taguchi's methods is shown, to statistically determine the effects of temperature, tearing speed and impact of the water on the stress at the yield point. This is a practical way to show the use of orthogonal arrays and the signal - noise ratio.

Analyzing the results obtained by testing, it was found that the greatest influence on the stress at the yield point is temperature, and the lowest is water activity.

Key words: Taguchi's methods, quality loss function, robustness, orthogonal arrays, the signal – noise ratio.

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
2. О ТАГУЧИЈУ.....	3
3. СТАТИСТИКА У ИНДУСТРИЈИ	5
3.1 Индустијски експеримент и планирање експеримента	5
4. КОНЦЕПТ ТАГУЧИ МЕТОДА	8
5. ФУНКЦИЈА ГУБИТКА КВАЛИТЕТА.....	13
6. РОБУСНОСТ	20
7. ОРТОГОНАЛНЕ МАТРИЦЕ	23
8. УТИЦАЈ ТАГУЧИЈЕВИХ МЕТОДА	27
9. ПОЛИМЕРНИ МАТЕРИЈАЛИ (ПЛАСТИКЕ).....	30
9.1 Историјат.....	30
9.2 Добијање полимера и особине	31
9.3 Врсте полимерних материјала.....	33
9.4 Структура полимера.....	34
9.5 Додаци	35
9.6 Механичка својства полимера.....	36
9.7 Полиетилен	38
10. ИСПИТИВАЊЕ.....	40
10.1 Карактеристике машине ZWICK	42
10.2 Планирање експеримента	43
10.3 Утицај посматраних фактора на напон на граници течења.....	45
10.4 Резултати.....	53
10.5 Анализа резултата	53
11. ЗАКЉУЧАК.....	59
ЛИТЕРАТУРА.....	61

1. УВОД

Квалитет производа је веома битна ствар за тржишни успех производа. Контрола квалитета је увек била незаобилазан фактор у производњи али тек осамдесетих година двадесетог века почиње укључивање контроле квалитета већ у фази развоја производа.

Начин размишљања о квалитету који је тада усвојен поштује се и данас. Основна идеја је да квалитет производа и његова поузданост морају бити утемељени у почетној фази циклуса производа, у фази развоја.

У прављењу система квалитета предњачили су Јапанци који су оригиналним идејама успели да опораве порушену индустрију и наметну своје индустријске производе светском тржишту као веома квалитетне. У организацији система квалитета битно место заузимају експериментална испитивања и употреба знања из статистике.

Један од оснивача јапанског концепта управљања квалитетом је гуру квалитета Едвардс Деминг (Edwards Deming). Он је педесетих година двадесетог века као експерт америчке владе дошао у Јапан и почео да учи јапанске инжењере контроли квалитета. Под утицајем учења о контроли квалитета неки јапански инжењери су постигли завидне успехе у тој области. Један од најуспешнијих је Геничи Тагучи (Genichi Taguchi).

Тагучијеве методе су веома брзо прихваћене у јапанској индустрији и индустрији Сједињених америчких држава. Његове методе су методе које се заснивају на аутентичном Тагучијевом размишљању и за њихову употребу је потребно знање из статистике. Тагучијеве методе се користе за унапређење квалитета.

У основи ових метода је функција губитка квалитета коју је Тагучи дефинисао. Тагучи у први план ставља квалитет, каже да се губици производа приписују друштву од момента када је производ допремљен крајњем кориснику, и на тај начин поручује да је квалитет од великог значаја за друштво.

Тагучи је тврдио да није довољно вршити контролу квалитета у току производње и исправљати грешке, већ да је потребно правилно искористити време при пројектовању и на тај начин смањити трошкове контроле и преправке. Допrineо је развоју техника планирања експеримената.

Тагучијеви закључци су да производе треба конструисати тако да буду робусни, односно да варијације производа и производног процеса буду смањене тако да производ буде у стању да извршава све задатке и у најтежим условима.

Тагучијеве методе се примењују у различитим сферама, у индустријским експериментима, маркетингу, организацији итд. Ипак, највећи допринос Тагучијевих метода се види у планирању експеримената. Употребом Тагучијевих ортогоналних матрица и логаритамског одзива сигнал/бука могуће је направити експеримент са малим бројем понављања, што доводи до оптимизације експериментисања и развоја. У последње време има много триболошких истраживања у којима се користе Тагучијеве методе.

Данас се користи много врста материјала. По количини производње важно место заузимају полимерни материјали. Због својих особина, пре свега мале тежине, веома су

тражени па се константно стварају нове врсте полимера. Због тога су испитивања полимерних материјала веома атрактивна за науку.

Једна од најчешће коришћених врста полимера су полиетилени. Од полиетилена се бризгањем израђују чепови за флаше, делови за играчке, делови за уређаје за домаћинство и друго.

Испитивањем механичких особина једне врсте полиетилена, ознаке GC 7260, у овом раду ће бити приказана употреба Тагучијевих метода. Биће приказане све фазе, од планирања експеримента, избора утицајних фактора, вршења експеримента и одређивања експерименталних одзива и анализе резултата. За анализу резултата је могуће користити компјутерске програме, у овом раду је коришћен програм Minitab 16.

2. О ТАГУЧИЈУ

Геничи Тагучи (1. Јануар 1924. - 2. Јун 2012.) је био јапански инжењер и статистичар [1]. Педесетих година двадесетог века Тагучи је развио своју методу која је омогућила примену статистике у процесу унапређивања квалитета производа. Многи западни статистичари су његове методе сматрали контраверзним и недовољно утемељеним, али су многи други прихватили концепте које је Тагучи поставио.

Тагучи је рођен у Токамачију, граду текстилне индустрије, у покрајини Нигата [2]. Студирао је текстилно инжењерство са намером да почне породични посао производње кимона. За време другог светског рата био је распоређен у институт јапанске царске морнарице.

После рата, 1948. године почиње да ради за министарство здравља и заштите животне средине. Током рада у министарству дошао је под утицај познатог статистичара професора Матосабуро Масујаме који га је заинтересовао за пројектовање експеримената (DOE). Радио је и у институту за статистику и учествовао у експериментима везаним за производњу пеницилина које је радила компанија "Моринага Сеика".

Почео је да ради у јапанској телефонској корпорацији (Nippon Telegraph and Telephone) баш у време када је статистичка контрола квалитета под утицајем професора Деминга и јапанске заједнице статистичара и инжењера постала популарна. Дванаест година је развијао методе за унапређење квалитета и поузданости. Његове идеје почеле су да примењују многе компаније у Јапану, а међу првим је био аутомобилски гигант Тојота (Toyota).

Током педесетих година је сарађивао са многим научним институтима и 1954.-1955. је био гостујући професор на индијском статистичком институту, где је радио са многим познатим статистичарима као што су Фишер и Валтер Шуварт. Ту се упознао са ортогоналним матрицама које ће му послужити да развије своје методе.

Тагучи је докторирао на универзитету Кјушу 1962. године и већ 1964. године је постао професор универзитета у Токију. Његове методе тада почињу да користе многе компаније као што су Бел телефони (Bell Labs), Форд (Ford Motor Company), Зерокс (Xerox), Боинг (Boeing) и многе друге.

Од 1982. године Тагучи је саветник јапанског института за стандарде и извршни директор америчког института за набавку. Његови концепти који се односе на планирање експеримената, функцију губитка, робустан дизајн и смањење варијација се примењују и ван индустрије у разним областима као што су биотехнологије, маркетинг итд.

Тагучи је 1997. године ушао у америчку ауто – мото дворану славе што је пре њега успело његовим сународницима који се сматрају најзаслужнијим за развој јапанске ауто индустрије, Сочирои Хонди и Еиди Тојоди.

Његова основна идеја је била да се производи и процеси тако обликују да буду под што мањим утицајем околине. Такав приступ се назива робустан план (дизајн). Тагучијева истраживања су била фокусирана на комбиновању инжењерских и статистичких метода у циљу смањења трошкова и побољшања квалитета. Ово је било

посебно важно за обнову и ревитализацију јапанске индустрије која је била уништена након другог светског рата. Тагучи је на основу својих истраживања предложио концепт за побољшавање квалитета у свим фазама пројектовања и производње. Да би технику планирања експеримената учинио лако и прихватљивом у индустријској пракси, Тагучи је увео неколико нових идеја.

Главни циљ Тагучијевог плана експеримента је да се [3]:

- минимизирају варијације процеса или производа и
- дизајнира робустан и флексибилан процес или производ који је прилагодљив условима животне средине.

Тагучи је добио неколико важних признања за свој научни рад. Добитник је медаље којом га је одликовао јапански цар, био је почасни члан и председник организација које су се бавиле квалитетом.

3. СТАТИСТИКА У ИНДУСТРИЈИ

Статистика представља примену научних математичких принципа на прикупљање, одабирање, груписање, обраду, анализу, представљање и тумачење нумеричких података. Статистичке методе могу да се примењују у разним областима, као што су биологија, економија, инжењерство, медицина, јавно здравље, психологија, маркетинг, образовање и спорт. Многе економске, социјалне, војне и политичке одлуке немогуће је донети без коришћења статистичких метода и техника, као што је дизајн експеримената. У индустрији, статистика заузима значајну улогу у управљању и контроли квалитета, користећи се разним процесима заснованим на анализама података.

Као научна дисциплина, статистика се дели на:

- дескриптивну - свеобухватно разматрање статистичког скупа чија се маса података организовано прикупља, одабира, групише, предочава и тумаче добијени резултати анализе. Сирови статистички подаци се на основу израчунавања различитих карактеристика статистичког скупа свODE на једноставнију и лакше разумљиву форму (уколико се истраживање примењује на све јединице скупа (читав скуп), скуп представља статистичку популацију) и
- интерференцијалну - заснива се на узорку изабраних јединица из статистичког скупа помоћу којег се доносе закључци о читавом статистичком скупу.

Закони вероватноће представљају мост између дескриптивне и интерференцијалне статистике. Вероватноћа подразумева већ познате податке и уочавање законитости међу њима, док статистика представља прикупљање, распоређивање, обраду и тумачење резултата.

Традиционална улога статистике у индустрији је да буде употребљена на пројектима, или да запослени користе алате као што су статистичка контрола процеса и креирање експеримената. Улога статистике је данас далеко већа. Статистика се користи на свим нивоима организације (управници, научници и инжењери). Неопходно је наћи улогу статистике у послу и правилно је употребити. За добро пословање у данашњем окружењу неопходно је унапредити знање из статистике.

3.1 Индустријски експеримент и планирање експеримента

Експеримент у индустрији се обично спроводи са циљем да се стекну знања о одређеном процесу или производу (карактеристике). Успех експеримента и унапређење перформанси испитиваног процеса је могуће само ако постоји потпуно разумевање проблема [4].

Добро организован и добро осмишљен експеримент пуно вреди. Лоше организован и лоше осмишљен експеримент може довести до потпуно погрешних закључака. Славни научници, Фарадеј, Њутн и многи други су у својим истраживањима примењивали експерименталне технике.

Циљ експеримента може бити испитивање неких особина у чисто научне сврхе, испитивања у оквиру развоја производа, оцена неких карактеристика при оптимизацији неког производа и оцена перформанси (карактеристика) постојећих система и процеса.

Планирање експеримента је моћна техника да се проуче утицаји одређених фактора на перформансе посматраног процеса и да се одреде њихове вредности да би излазна вредност система била задовољавајућа. Успех сваког експеримента зависи од неколико фактора: знања из статистике, инжењерских знања, вештине планирања, тимског рада и других. Планирање експеримента је стратегија спровођења експеримента да би квалитетни закључци и сазнања били добијени ефикасно и економично.

Без обзира о ком типу експеримента је реч (научна истраживања, развој производа, ревитализација производа, оптимизација, оцена перформанси постојећих производа), њему би по правилу требало да претходе активности везане за:

- детаљан преглед литературе везан за предметну проблематику,
- теоријске анализе,
- нумерички прорачуни и
- симулације изведене помоћу рачунара.

Истраживања су показала да је један од главних разлога за неуспех експеримената неразумеваше испитиваног проблема. За успех експеримента је потребан тимски рад, који обично укључује људе из службе пројектовања, производње, истраживања и развоја, контроле квалитета и потребна је посвећеност управе. У суштини, неразумеваше проблема често доводи до неуспеха, односно изгубљеног времена и новца, као и осећања фрустрације за све укључене.

Успешна примена планирања експеримента у модерном индустријском свету захтева мешавину статистичких знања, доброг планирања, инжењерских знања, квалитетне комуникације и тимског рада. Препорука је да је потребно урадити следеће ствари током планирања:

- идентификовати утицајне факторе и број нивоа сваког од фактора,
- развијати тимски дух у тиму који ради на експерименту како би се обезбедило веће залагање чланова тима,
- проверити колико добро експеримент приказује реалне услове,
- одредити ко ће радити који део експеримента и како и
- дефинисати колико брзо учесници експеримента треба да управи (менаџменту) образложе резултате.

Излазна вредност експеримента је најчешће критична карактеристика перформансе производа која не одговара корисницима и често приказује квалитет производа. Важно је одабрати адекватну излазну вредност експеримента и измерити је на исправан начин. Препоруке које могу бити корисне за инжењере при бирању излазне вредности су:

- треба бирати излазне вредности које могу бити прецизно измерене и
- користити излазне вредности које су потпуно дефинисане и на одговарајући начин приказују везу између улазних и излазних вредности.

Потребно је изабрати одговарајући план експеримента. Од избора плана зависи његов успех и при избору треба узети у обзир: природу проблема, број фактора који се проучавају, ресурсе који су доступни за експеримент и време потребно за извођење експеримента. Избор плана зависи од следећих фактора:

- броја фактора и интеракција (ако их има),
- сложености коришћења сваког плана,
- статистичке ефикасности сваког плана,
- једноставности припреме плана,
- природе проблема и
- цене и временских ограничења.

Могуће је извршити пробни експеримент који је користан да се смањи број променљивих које се посматрају. Када се идентификују кључни фактори, интеракције између њих се могу посматрати помоћу факторијалног експеримента.

Неопходно је извршити потврдни експеримент да се верификују резултати из статистичке анализе. Неки од могућих узрока за непостизање циља експеримента су:

- погрешан избор плана експеримента,
- неодговарајући избор одговара (излазне вредности),
- неуспех одабира променљивих које утичу на излазну величину система,
- неадекватан мерни систем и
- недостатак знања из статистике.

4. КОНЦЕПТ ТАГУЧИ МЕТОДА

Иако је контрола квалитета незаобилазан фактор у производњи тек 80-их година двадесетог века је почела шира примена ових метода у фази развоја производа. Тагучи каже да се добар квалитет уз ниску цену не може постићи само инспекцијом делова и праћењем квалитета у производном процесу, већ се квалитет мора уградити у производ у фази пројектовања. Ово је један од најважнијих Тагучијевих погледа на проблематику квалитета.

Основни концепт Тагучијеве стратегије чине следеће претпоставке:

- квалитет се може представити преко губитка за потрошача,
- губитак за потрошача функционално зависи од свих варијација карактеристика производа и назива се функција губитка,
- карактеристика квалитета је представљена идеалном циљном вредношћу,
- побољшање квалитета производа се постиже смањењем варијација око циљне вредности у сваком нивоу израде производа,
- осетљивост фактора на промену се може мерити статистички и позната је као однос сигнал/бука или S/N однос (signal-to-noise ratio) и
- квалитет коначног производа је резултат планирања и израде производа.

Тагучи дефинише лош квалитет као губитак за друштво. Сваки пут када производ не успе да изврши намену за коју је направљен сматра се губитком. Док је највећа пажња била усмерена на Тагучијеве статистичке методе, суштина његове поруке се више односи на његов концептуални оквир за процес побољшања квалитета.

Са ове тачке гледишта Тагучијеве идеје могу бити подељене на два основна концепта [1]:

1. Губици квалитета морају бити посматрани као одступање од постављеног циља који се не повећава арбитражним спецификацијама. Губици квалитета морају бити мерени системима процене трошкова – "губитак за друштво" - то нису локални трошкови настали услед детекције (откривања) дефекта.

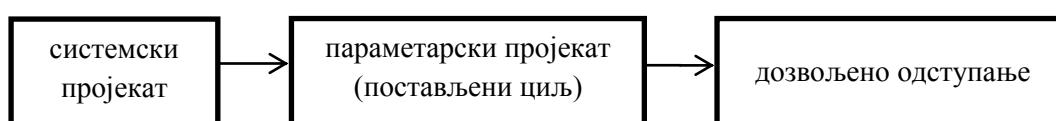
2. Постизање високог нивоа система праћења квалитета, тј. економичности истог, што мора да буде уграђено у производ. Квалитет се може постићи економично, кроз контролу, тј. надзор и праћење производње. Три аспекта квалитета морају бити испоштована:

1. системски (функционални) пројекат,
2. параметарски (циљни) пројекат и
3. дозвољено одступање (толеранција) пројекта.

Системски и параметарски пројекат обезбеђују максималну могућност за смањење трошкова процеса праћења квалитета. Реализација пројекта најчешће изискује повећане трошкове у процесу постизања вишег нивоа квалитета. Системски пројекат је део пројектовања у којем се утврђује основни нацрт и инжењерски (технички) концепт.

Параметарски пројекат је део у којем су садржани следећи номинални елементи: циљне димензије, карактеристике материјала, напони итд. Дозвољено пројектно

одступање (толеранције) је део пројекта у којем су димензионо изражене дозвољене толеранције пројектних мера (слика 4.1). Системски пројекат захтева инжењерске експертизе, зато се третира као конципирано - оријентисана активност где је присутна мала улога статистичких метода, или се пак иста не појављује (не бележи се њена присутност), али у оба случаја, и у случају конструктивног параметра и у случају дозвољених пројектних одступања инжењеринг може имати пресудну реч о потреби увођења статистичких метода у циљу побољшања јачине пројекта. Тагучи гради оба, и свој концептуални радни оквир и специфичну методологију примене по установљеним правилима. На први поглед, морају изгледати једноставно. Познато је да је пад квалитета догађај када производ одступа од свог пројектног (задатог) циља, као и да трошкови дораде или одбацивања производа због шкарта изискују додатне трошкове, тако да се производ креће кроз производни систем.



Слика 4.1 Три фазе циклуса пројектовања

Интерпретација става 1. је веома једноставна, наиме неколико учесника ће сумњати да је улагање у квалитет (пројектовање квалитета) јефтиније од покушаја да се врши надзор, поново пројектује конкретан производ због оскудности (мањкавости) првобитног изражене у процесу производње или што је још горе, ако иста дође до изражаја код купца, тј. крајњег корисника. Ово је део онога што се подразумева горе наведеним ставом. Нажалост, ове једноставне интерпретације не обухватају у потпуности све оно што је Тагучи подразумевао (желео да каже) у наведеним ставовима, заправо, нешто од онога што Тагучи каже се коси са конвенционалним QC праксом примењеном у америчкој индустрији.

Примена Тагучијевих метода је могућа у различитим околностима:

- у оптимизовању квалитета и цене,
- у брзом и тачном прибављању техничких информација,
- при дизајнирању и производњи високо поузданих производа и процеса по ниским ценама,
- у развоју флексибилних технологија за дизајнирање читавих група високо квалитетних сродних производа, чиме се смањује време истраживања, развоја и испоруке,
- најчешће се користи за побољшавање постојећих производа и процеса и
- применом методе се смањује потреба за експериментима.

Тагучијеве методе су познате као методе инжењеринга квалитета. Главне одреднице метода су [5]:

- дизајнирање параметара,
- одређивање варијација,
- појам идеалног квалитета,
- “off line” контрола квалитета,
- функција губитка квалитета,
- однос сигнала и шума и
- филозофија робусног дизајна.

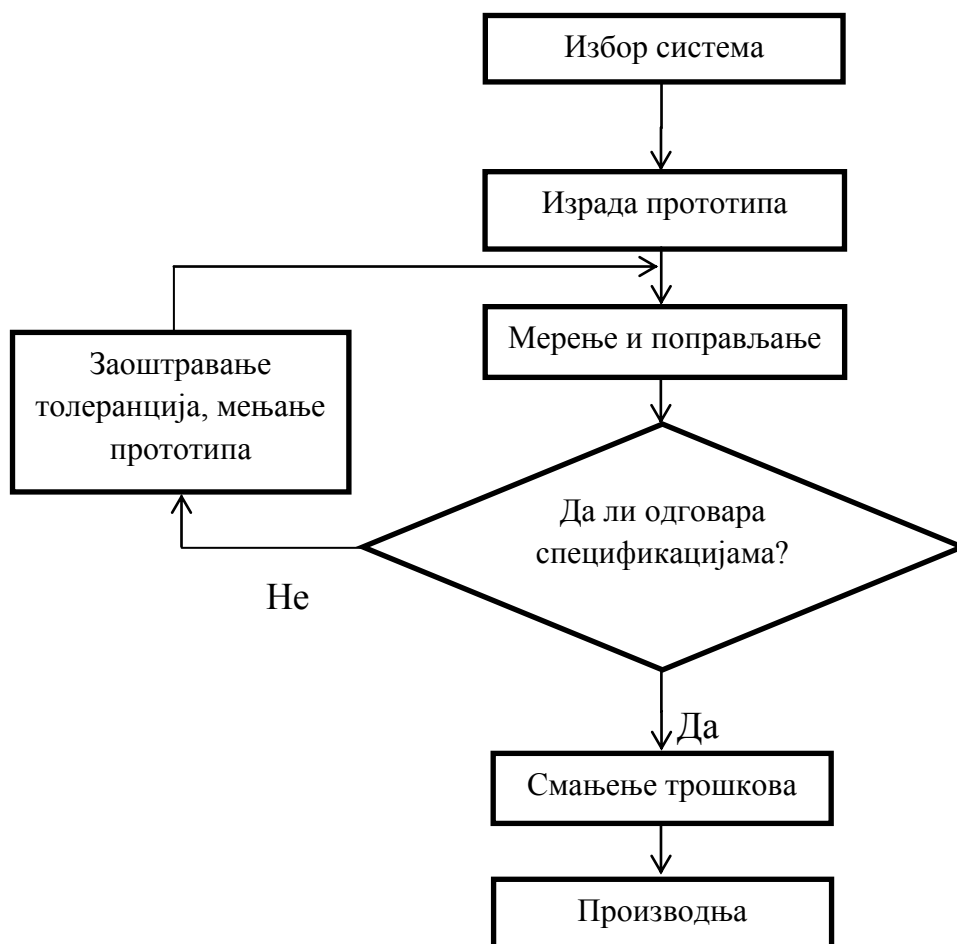
Ове одреднице су главна обележја Тагучијевих метода, које због специфичности метода и даље изазивају много супротних мишљења светских статистичара и научника који се баве инжењерингом квалитета.

Кратко поређење неких ТМ (Тагучијеве методе) техника са конвенционалном статистичком праксом је приказано у табели 4.1.

Табела 4.1. Поређење Тагучијевих метода са стандардним статистичким пројектом и методама анализе [1]

	Тагучијеве методе	Стандардне метода
1.	Однос S/N	Одговарајуће трансформације, анализа подразумева посебно стандардно одступање.
2.	Ортогоналне матрице	Контролни пројекти, факторијални и фракционо-факторијални пројекти.
3.	Линеарни графикони	Променљиве процедуре и табеле.
4.	Унутрашњи и спољашњи низови	Анализа осетљивости, промена компоненти анализе, нацрти пројеката, разне компоненте анализе.
5.	Једнопотезни пројекти (носе победничку оптимизацију)	Стратегија секвенцијалног пројекта, одговарајуће површинске методе, компјутерске методе.
6.	Двофазна процедура (користи сигнал и промену буке)	Посебна анализа локације и распрострањености, важност интеракција, преостала (резидуална) анализа.
7.	Комплекс ANOVA за анализу	Нормална вероватноћа учртавања, остале грешке технике, стандардне регресионе технике.
8.	Дислоциране компоненте се не узимају у обзир при анализи	Резидуални елементи за учртавање и/или процедуре анализе резистентних података.

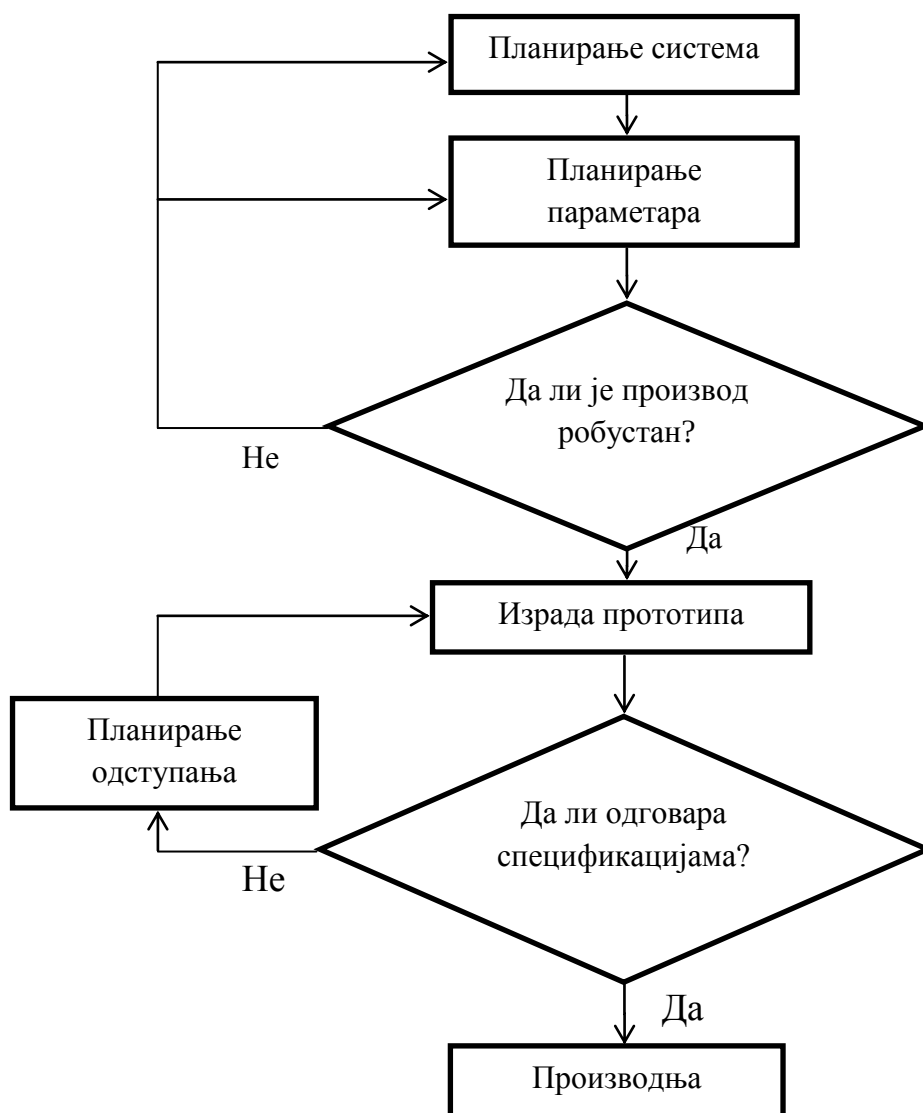
Проучавањем фаза Тагучијевих метода уочава се разлика између традиционалног начина планирања и Тагучијевог начина. Основна идеја код традиционалног начина је решавање проблема који се јављају, док је код Тагучија најважније избегавање, односно спречавање проблема пре него што настане.



Слика 4.2 Традиционална метода

План традиционалне методе планирања је приказан на слици 4.2. Традиционална метода почиње избором одговарајућег система, затим следи израда прототипа, мерења и вршење промена на прототипу ако дати производ не одговара спецификацијама. Када производ задовољи тражене спецификације спреман је за производњу.

На слици 4.3 је приказан Тагучијев начин планирања [5]. Тагучијев план је базиран на томе да робусност буде утемељена пре израде самог прототипа ради смањења трошкова. Применом Тагучијевих метода добрим делом се избегавају преправке у самом процесу производње.

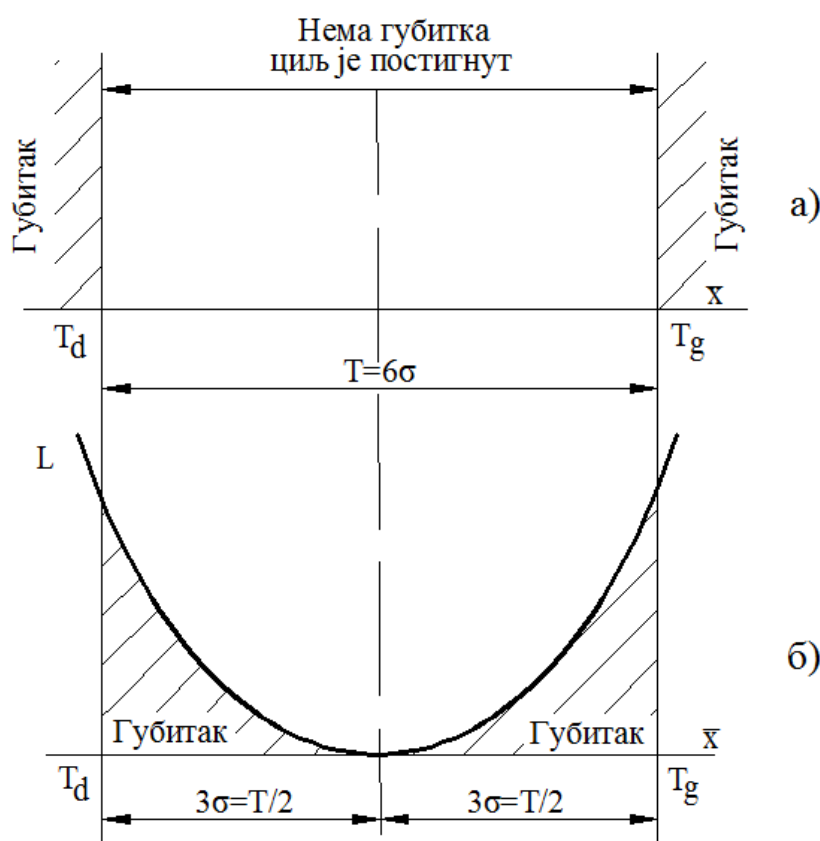


Слика 4.3 Тагучијеве методе

5. ФУНКЦИЈА ГУБИТКА КВАЛИТЕТА

У срцу Тагучијеве филозофије се налази концепт губитка квалитета [1]. Овај концепт представља основу за разумевање онога што Тагучи покушава да уради и чињенице његове успешности у томе што ради. Идеја није нова. Садржана је у корену 200 година старих математичких основа статистике које је поставио Гаус и које су биле основа за доношење одлуке на основу статистичке теорије најмање последњих 40 година. И поред тога, Тагучи је био изузетно успешан у убеђивању оних који нису били присталице статистике у њен значај, можда зато што је он инжењер.

Поређење Тагучијеве идеје са класичним прилазом се најбоље може објаснити сликом 5.1.



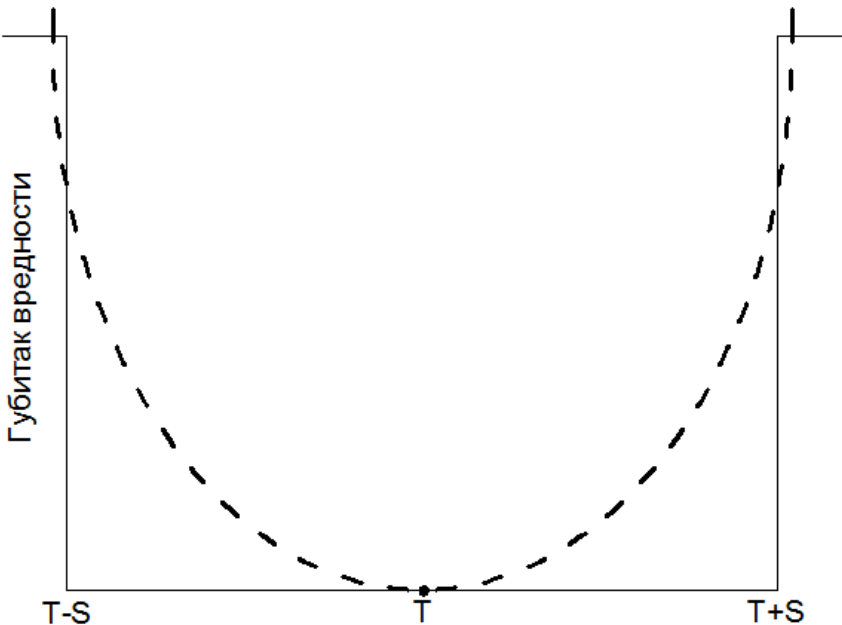
Слика 5.1 Графички приказ толерантног поља и функције губитка
а) класични прилаз б) Тагучијев прилаз

Ознаке на слици 5.1 представљају:

T - толеранцијско поље, тачност обраде [mm],

T_d - доња граница толеранцијског поља [mm],

T_g - горња граница толеранцијског поља [mm],



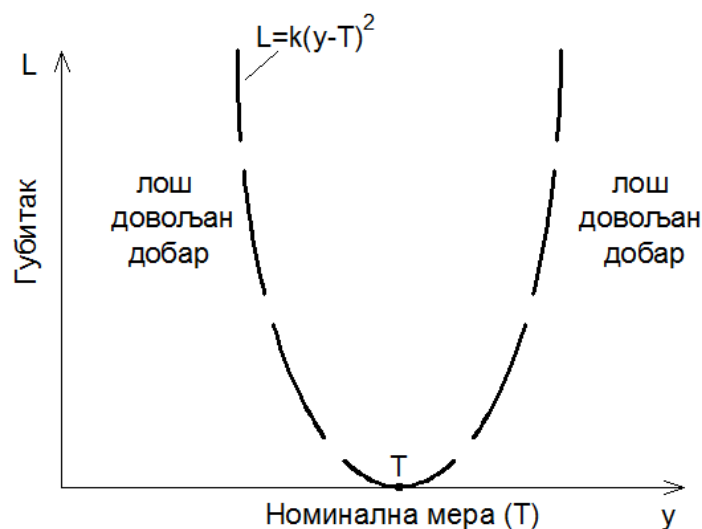
Слика 5.2 Функција губитка

[illegible]

Неки посматрачи верују да ће друштвени губици такође подразумевати губитке настале пре испоруке производа. Било о ком случају да се ради, квалитет се дефинише у условима комплетног система у оквиру којег је производ произведен и коришћен, а не само у условима разматрања примене на специфичним (посебним) инстанцама у систему у којима се мере квалитативне карактеристике. Ово значи да не морају само трошкови дораде или шкарта на разним инстанцама производног процеса бити разматрани, али би требало узети у обзир трошкове настале губитком продуктивности услед неефикасности узрокованој варијацијом. Ово подразумева трошкове повећаног нивоа одржавања, губитка производног времена, трошкове услед отказа опреме, прекомерног трајања пописа, прекомерног рада и администрације и времена изгубљеног на састанцима и непродуктивним дискусијама са добављачима, дилерима и дистрибутерима. И што је најгоре од свега, најтеже је ухватити трошкове према клијенту настале као резултат смањене производне перформансе (особине), поузданости и трајности. И као што Деминг подсећа, овај последњи трошак слабог, незадовољавајућег квалитета лако иритира купце, односно приморава их да потраже другог произвођача који ће задовољити њихова очекивања.

Непрекидна линија графика приказаног на слици 5.1 показује шта се у дуалитету (улаз-излаз) дефинише као губитак. Све док је квалитет у оквиру спецификација, све је у реду и ни једна вредност не представља губитак. Чим вредност изађе из оквира спецификација, производ више није за продају, читава вредност се губи и тада производ мора бити одбачен као шкарт или мора бити дорађен. Није потребно рећи да су се велике битке добиле преко тих граница [1].

Тачан облик функције губитка је тешко, можда чак и немогуће одредити, али у пракси је могуће извести одговарајуће апроксимације. Због тога што функција може имати много различитих облика, Тагучи је нашао просту квадратну функцију која апроксимира понашање губитка у много случајева (слика 5.3). Функција губитка доприноси сталном смањењу одступања у производним функционалним карактеристикама.



Слика 5.3 Квадратна функција губитка

Пошто функција губитка представља квадратну форму, могуће је развити у Тејлоров ред око тачке номиналне вредности T :

$$L(y) = L(T + y - T) = L(T) + \frac{L'(T)}{1!}(y - T) + \frac{L''(T)}{2!}(y - T)^2 + \dots \quad (5.1)$$

Са слике 5.3 се види да функција $L(y)$ има минимум у тачки T , тако да је могуће функцију губитка апроксимирати трећим чланом Тејлоровог реда око тачке T као:

$$L(y) = k(y - T)^2, \quad (5.2)$$

где је:

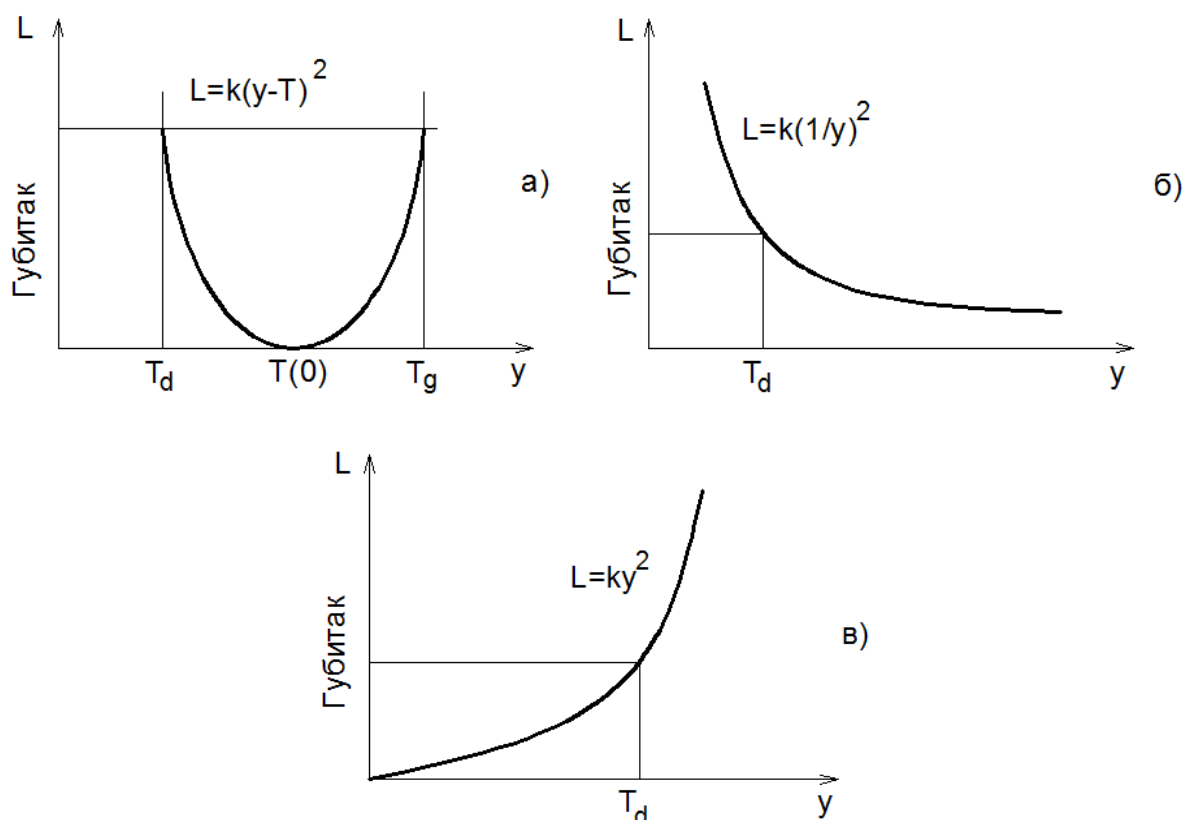
$L(y)$ - губитак у новцу,

k - коефицијент губитка,

T - номинална вредност карактеристике квалитета (циљна вредност) и

y - вредност карактеристике квалитета.

На слици 5.4 су приказани карактеристични облици Тагучијеве функције губитака.



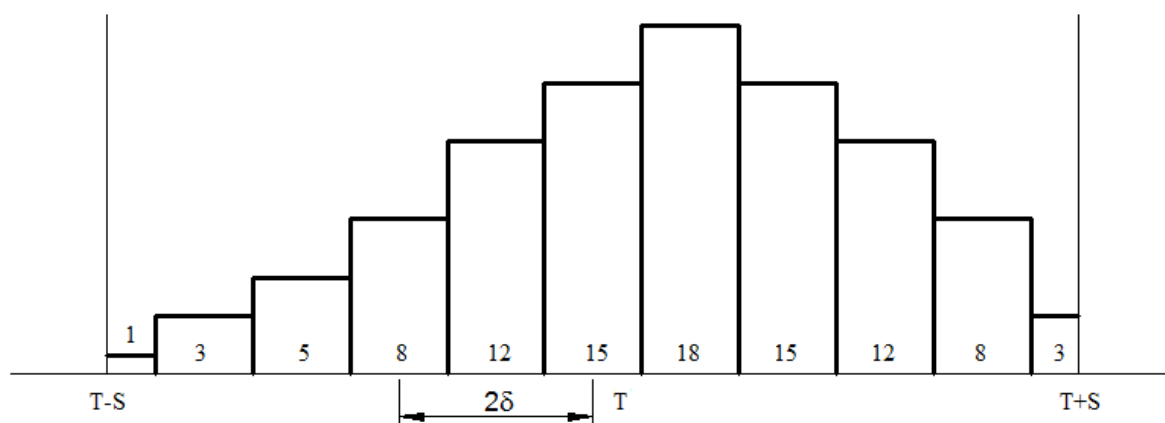
Слика 5.4 Различити облици Тагучијеве функције губитака

Невоља са претходно описаним приступом обрачунавања трошкова квалитета је та што је исти нереалан [1]. Спецификациони лимити свакако не могу бити овим подељени. Обрачунском раднику је потребан једноставан систем да држи корак, тј. да прати траг производних трошкова, производне ефикасности и да има увид у утрошак материјала.

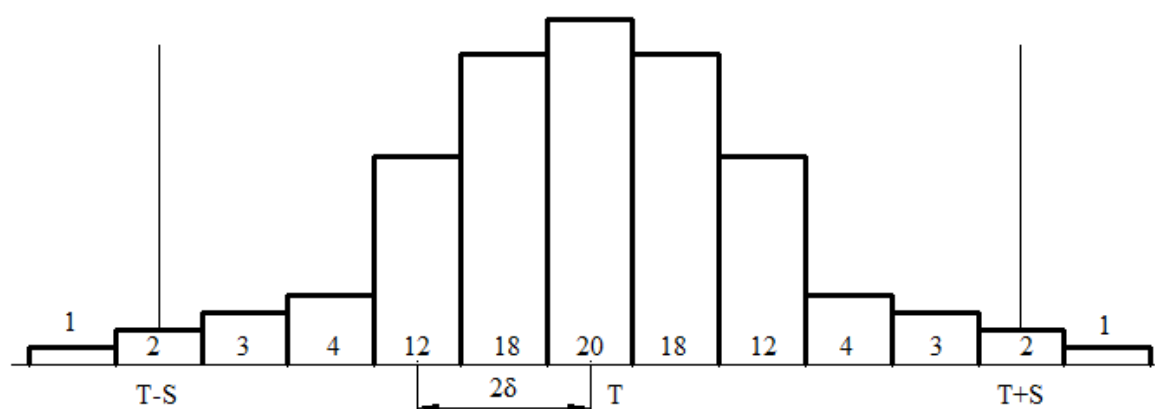
Према томе, они морају бити у могућности, тј. оспособљавани да измере квалитет уписивањем резултата мерења на једну страну или пак на другу страну свог помоћног листа. Нажалост, природа не ради под оваквим рестрикцијама. Нема изненадних (наглих) промена од савршеног до неупотребљивог како је укрштена нека арбитражна граница. Оно што се заправо догађа је то да се перформанса постепено погоршава како мера квалитета све више одступа од постављеног циља. Заправо, погоршавање се

наставља како се предметни сегмент помера испод спецификационих листова: више од 100% губитака се може догодити када деградирани производ може узроковати губитке испод тоталитета своје властите вредности (нпр. када слаба перформанса једне компоненте монтаже резултира у деструкцији читаве линије).

Једна секвенца ових концепата је та да достижући нулу (0) дефекти не могу бити довољно добри. На сликама 5.5, 5.6 и 5.7 је приказана поједностављена демонстрација оваквог решења. На сликама 5.5 и 5.6 су дати хипотетички хистограми дистрибуције производа добијени од два добављача. Бројеви у свакој колони хистограма представљају % производа који спада у ту колону. Производ добављача А је у оквиру спецификације, док добављач В производи 4% који је управо ван истих. Са друге стране, дистрибуција производа добављача А није постављена као циљни момент пројекта T , и значајно је већа променљивост у поређењу са добављачем В. То је заправо оно што се типично добија од (перфектно функционисање) 100% контроле, односно надзора производа.



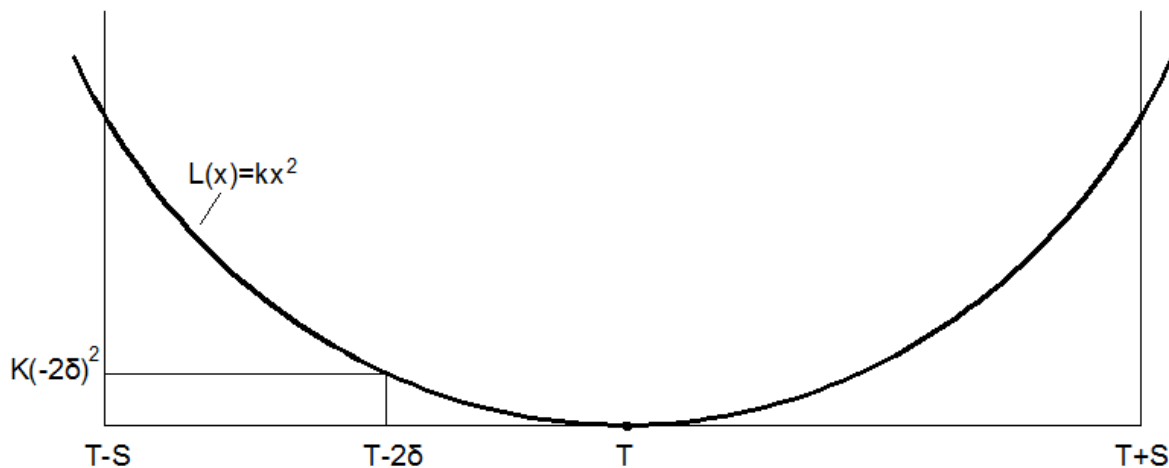
Слика 5.5



Слика 5.6

Потребно је размотрити шта су у ствари губици у сваком случају. На слици 5.7 приказана је типична функција губитка, што је често разумна апроксимација -

квадратни губитак. Ово значи да се губитак јавља онда када параметар производа одступа од постављеног циља и пропорционалан је квадрату растојања, тј. удаљености параметра од циља. Алгебарски представљено ово може бити написано, тј. представљено следећим изразом: губитак када је параметар дистанце D од циља, једнак је $K \cdot D^2$.



Слика 5.7

На пример за ћелију приказану на слици 5.5 која је центрирана као дистанца 2δ од T , приближни губитак од 8% добављача А, тј. његовог производа који садржи је:
 $0,08 \cdot K \cdot (2\delta)^2 = 0,32K\delta^2$.

За добављача В, са друге стране, губитак би био следећи:
 $0,12 \cdot K \cdot (2\delta)^2 = 0,48K\delta^2$.

Ако се ова рачуница примени, тј. изведе за све ћелије на слици, лако је уочити да укупан губитак код производа добављача А приближно износи:

$$K\delta^2 \cdot (0,25 + 0,48 + 0,45 + 0,32 + 0,12 + 0,18 + 0,60 + 1,08 + 1,28 + 0,75) = 5,51K\delta^2.$$

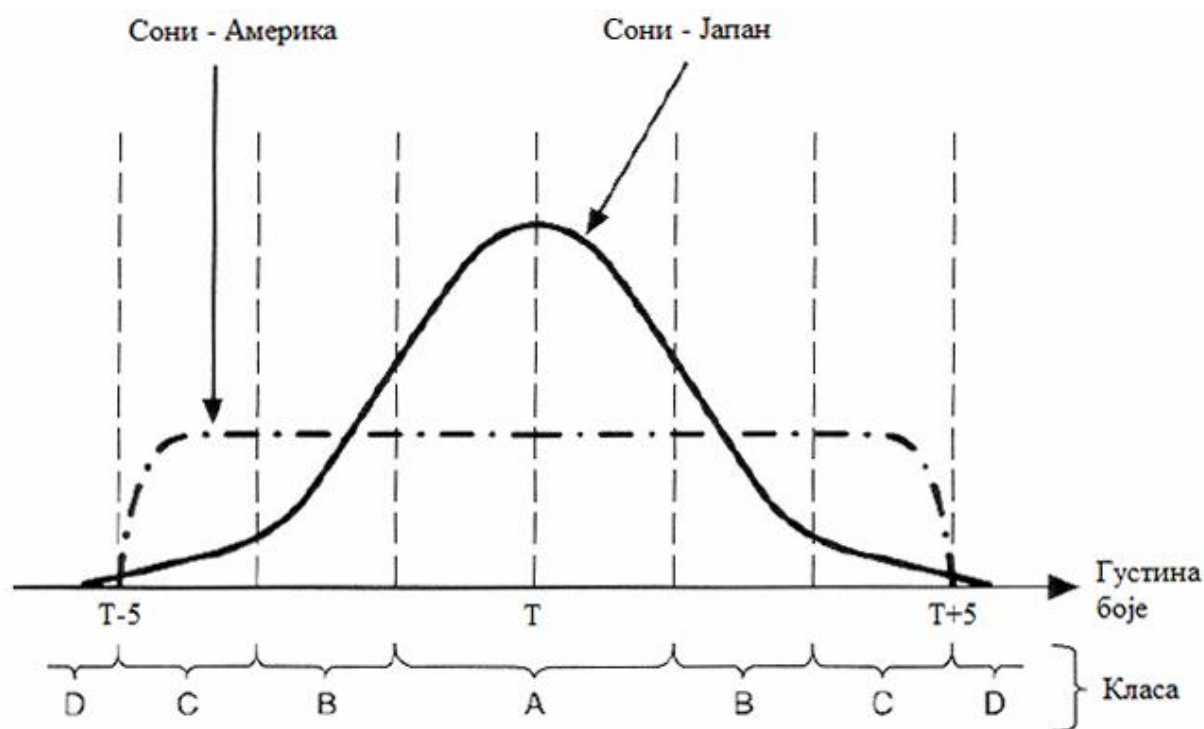
Губитак за добављача В приближно износи:

$$K\delta^2 \cdot (0,36 + 0,50 + 0,48 + 0,36 + 0,48 + 0,18) \cdot 2 = 4,72K\delta^2.$$

Другим речима, губитак код добављача А је за око 16,73% већи него што је то случај са добављачем В, чак и ако добављач А доноси нулте (0) дефекте, док добављач В доноси 4% дефектност. Штавише, добављач А можда мора да сноси додатне трошкове 100% контроле, док код добављача В то није случај.

Пример сличан овоме у пракси се догодио јапанском произвођачу телевизора Сони (Sony) [6]. Осамдесетих година двадесетог века Сони је производио телевизоре у две фабрике. Сони – Јапан је поштовао Тагучијеве принципе, и главна карактеристика производа, густина боје (color density), прати криву у облику звона приказану на слици 5.8. Неки производи су били ван опсега ($T-5$, $T+5$), и долазило је до штете. У другој фабрици, америчком делу Сонија, користили су приступ да је потребно одбацити све делове чије су спецификације ван опсега и производња је била организована тако да уопште није било производа чије су спецификације ван опсега (нула дефекти), међутим густина боје је имала скоро униформну расподелу.

Приметили су да купци радије купују телевизор произведене у Јапану због бољег квалитета, иако фабрика у Јапану има већи број дефектних производа. Ова појава се објашњава тиме што велики број купаца који купе телевизор произведен у Јапану добије уређај доброг квалитета чије су спецификације близу идеалним, а веома мали број купаца добије уређај слабог квалитета. Према томе, фабрика у Јапану је била много више цењена код купаца и успешније је пословала.



Слика 5.8

6. РОБУСНОСТ

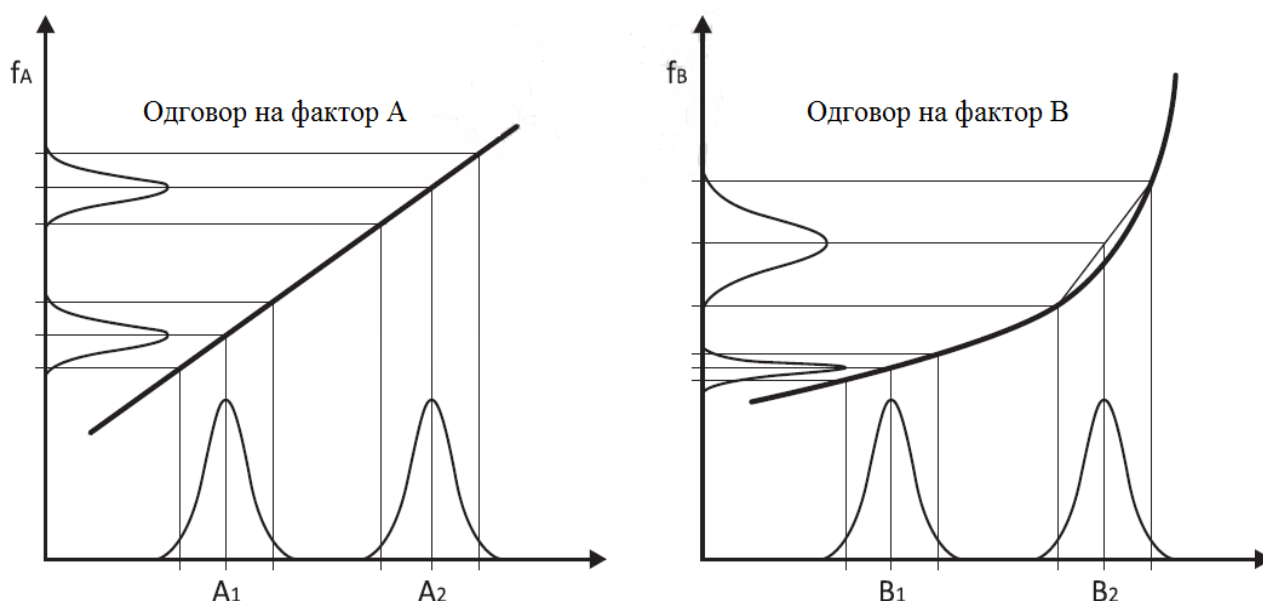
Робусни дизајн је инжењерска метода за унапређивање продуктивности током истраживања и развоја, тако да производи високог квалитета могу бити произведени брзо и јефтино [7]. Према Тагучију, робустан производ је онај који је креиран тако да су варијације производа и процеса смањене, док се истовремено перформансе приближавају идеалној вредности. Производ који је робусно дизајниран ће задовољити корисника чак и када је производ изложен екстремним условима експлоатације.

Робустан производ (или процес) је дефинисан као онај који извршава радне задатке како треба, чак и под несавршеним условима као што су варијације процеса производње или одређени опсег радних ситуација [8]. На пример, термин бука се користи да опише неконтролисане варијације које могу утицати на перформансе, а каже се да квалитет производа треба да буде робустан у односу на фактор буке.

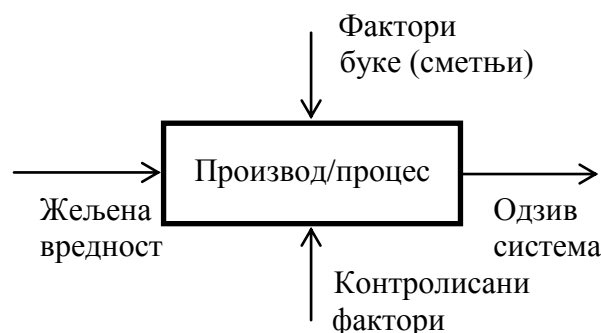
Робустан дизајн је делатност при развоју производа за побољшање жељене карактеристике производа, а при томе се смањују ефекти буке. У робусном дизајну користе се експерименти и анализе података за идентификацију робусних жељених вредности пројектних параметара који могу да се контролишу. Задата вредност робусног дизајна представља комбинацију вредности параметара дизајна за које се добијају жељене перформансе производа, унутар опсега радних услова и варијација производње.

Концептуално, робустан дизајн је једноставан за разумевање. За дате циљне перформансе (на пример, безбедност путника на задњим седиштима), може бити много комбинација вредности параметара које ће дати жељени резултат. Међутим, неке од ових комбинација су осетљивије на неконтролисане варијације од других. С обзиром да ће производ, вероватно, радити у присуству различитих фактора буке, требало би изабрати комбинацију вредности параметара која је најмање осетљива на неконтролисане варијације. Процес робусног дизајна користи експериментални приступ проналажењу ових робусних жељених вредности.

За разумевање концепта робусних, односно жељених вредности, треба размислити о два хипотетичка фактора који утичу на неку меру перформанси сигурносног појаса, као што је приказано на слици 6.1. Следе две претпоставке - фактор f_A има линеарни ефекат на перформансе и фактор f_B има нелинеарни ефекат. У односу на оно што се тражи, бирају се жељене вредности за сваки фактор: A_1 или A_2 за фактор A и B_1 или B_2 за фактор B . Под претпоставком да се ефекти f_A и f_B сабирају (додају), комбинација A_1 и B_2 ће обезбедити, приближно, исти ниво укупне перформансе као комбинација A_2 и B_1 . Варијација производње ће бити присутна у свакој изабраној (задатој) вредности, тако да стварна вредност не може да буде баш таква, као што је наведено. Избором вредности B_1 за фактор B , где је осетљивост одговора на фактор B релативно мала, нежељена варијација фактора B има релативно мали утицај на укупне перформансе производа. Дакле, избор B_1 и A_2 је више робусна комбинација жељених вредности од комбинације B_2 и A_1 .



Слика 6.1



Слика 6.2 Концепција робусног дизајна

При пројектовању параметара, постоје две врсте фактора који утичу на функционалне карактеристике производа и то: контролисани фактори (Control factors) и фактори буке (сметњи). Контролисани фактори су они фактори који могу лако да се контролишу као што су избор материјала, трајање циклуса, или температура калупа у процесу брызгања пластике (слика 6.2) [9]. Фактори буке (Noise factors) су фактори које је тешко или немогуће или сувише скупо контролисати. Постоје три врсте фактора сметњи: спољашњи фактори буке, унутрашњи фактори буке и сметње између производа.

Примери сваке врсте фактора сметњи и контролисаних фактора при пројектовању производа и процеса наведени су у табели 6.1 [10]. Фактори буке (сметње) узрокују да параметри производа одступају од циљних вредности.

Пројектовање параметара настоји да идентификује подешавања контролних фактора који чине производ неосетљивим на варијације у факторима буке, односно чине да производ буде више робустан, без стварног отклањања узрока варијације.

Жељена вредност процеса (Signal factors) представља тражени излаз система.

Одзив система (Response) представља стварни одзив система.

Табела 6.1 Примери контролисаних фактора и фактора буке (сметњи)

	Пројектовање производа	Пројектовање процеса
Спољашње сметње	- услови коришћења потрошача - ниска температура - висока температура - промене температуре - вибрације - влажност	- температура околине - влажност - варијације долазног материјала - оператер - промена напона - варијације између серија
Унутрашње сметње	- пропадање делова - пропадање материјала - оксидација (рђа)	- старење машине - хабање алата - погоршање стања
Међупроизводни поремећаји	- варијације од дела до дела иако треба да буду исти - Јангов модул еластичности - модул смицања - дозвољени напон	- промене од процеса до процеса
Контролисани фактори	- сви пројектовани параметри, на пример: - димензије и - избор материјала	- сви параметри процеса

7. ОРТОГОНАЛНЕ МАТРИЦЕ

Тагучијеве методе су засноване на вршењу процене или експеримената да се тестира осетљивост скупа променљивих одзива на низ контролних параметара (или независних променљивих), разматрајући експеримент помоћу "ортогоналне матрице", са циљем да се открију оптималне вредности контролних параметара [7]. Ортогоналне матрице представљају скуп добро избалансираних експеримената. У табели 7.1 је приказано осамнаест стандардних матрица са бројем колона на различитим нивоима. Назив матрице показује број редова и колона, и број нивоа у свакој од ових колона. На пример, матрица $L_4(2^3)$ има четири реда и три колоне са по два нивоа. Слично, матрица $L_{18}(2^13^7)$ има осамнаест редова, једну колону са два нивоа и седам колона са по три нивоа. Тако матрица L_8 има осам редова. Број редова ортогоналне матрице представља број потребних експеримената. Број експеримената најмање мора бити једнак броју степени слободе контролних параметара [7].

Табела 7.1 Стандардне матрице (приказ максималног броја фактора на нивоима 2, 3, 4 и 5)

Ортогонална матрица	Број редова	Максимални број фактора	Максималан број колона на овим нивоима			
			2	3	4	5
L_4	4	3	3	-	-	-
L_8	8	7	7	-	-	-
L_9	9	4	-	4	-	-
L_{12}	12	11	11	-	-	-
L_{16}	16	15	15	-	-	-
L_{16}	16	5	-	-	5	-
L_{18}	18	8	1	7	-	-
L_{25}	25	6	-	-	-	6
L_{27}	27	13	-	13	-	-
L_{32}	32	31	31	-	-	-
L_{32}	32	10	1	-	9	-
L_{36}	36	23	11	12	-	-
L_{36}	36	16	3	13	-	-
L_{50}	50	12	1	-	-	11
L_{54}	54	26	1	25	-	-
L_{64}	64	63	63	-	-	-
L_{64}	64	21	-	-	21	-
L_{81}	81	40	-	40	-	-

Уопштено, број степени слободe је за један мањи од броја нивоa тог фактора. На пример, у случају када један фактор (A) има два нивоa, и пет фактора (B, C, D, E, F) сваки по три нивоa. Табела 7.2 приказује одређивање степени слободe за овај пример. Број колона матрице представља максималан број фактора који могу бити посматрани помоћу ове матрице.

Одређивање степени слободe за фактор A са два нивоa и факторима B, C, D, E и F са по 3 нивоa је приказано у табели 7.2.

Табела 7.2

Фактори	Степени слободe
Систем A	1 $2-1=1$
B, C, D, E, F	$5 \cdot (3 - 1) = 10$
Укупно:	12

Правилан избор броја нивоa и вредности нивоa представља највећи део напора у планирању експеримената. Најчешће коришћене ортогоналне матрице су приказане у табелама 7.3, 7.4, 7.5 и 7.6 [11].

Табела 7.3 Ортогонална матрица $L_4(2^3)$

Број експеримента	Фактори		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Табела 7.4 Ортогонална матрица $L_8(2^7)$

Број експеримента	Фактори						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Табела 7.5 Ортогонална матрица $L_9(3^4)$

Број експеримента	Фактори			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Табела 7.6 Ортогонална матрица $L_{12}(2^{11})$

Број експеримента	Фактори										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
7	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

Ако матрица, која је изабрана на основу броја параметара и нивоа, има више параметара него што је потребно за реализацију експеримента, потребно је игнорисати прекобројне колоне. На пример, ако експеримент има осам фактора са по два нивоа биће употребљена матрица $L_{12}(2^{11})$, која је предвиђена за једанаест фактора са по два нивоа, тако што ће последње три колоне бити занемарене.

Однос S/N

Однос сигнал/бука (S/N), који је логаритамска функција излаза, служи као објекат функције за оптимизацију, задатак му је да помогне у анализи података и предвиђању оптималних резултата [7].

Постоје три форме односа (S/N) за оптимизацију проблема.

1. Мање боље

Рачуна се по обрасцу:

$$n = -10\log_{10}[\text{средња вредност суме квадрата измерених вредности}] \quad (7.1)$$

Користи се код рачунања неких губитака или дефеката где је жељена идеална вредност нула (нпр. анализа хабања итд.).

2. Веће боље

Рачуна се по обрасцу:

$$n = -10\log_{10}[\text{средња вредност суме квадрата реципрочних вредности}] \quad (7.2)$$

Користи се у случајевима када се тежи максималној вредности (на пример повећању производње). Обично се преводи на ‘мање боље’ узимањем реципрочних вредности измерених величина.

3. Номинално најбоље

Рачуна се по обрасцу:

$$n = -10\log_{10}\left[\frac{\text{квадрат средње вредности}}{\text{одступање}}\right] \quad (7.3)$$

8. УТИЦАЈ ТАГУЧИЈЕВИХ МЕТОДА

Права вредност Тагучијевих метода је њихова способност да доводе до промена у компанијама које се баве производњом [12]. Традиционална статистичка теорија је довела до веома мало промена у протеклих тридесет година, а стручњаци за статистику у САД су успели само да одрже постојеће стање у индустрији. Америчке компаније су направиле промене у пословању захваљујући примени статистичког управљања процесом (SPC - Statistic process control). Традиционално пројектовање (DOE) неће давати ефекте уколико се не модификује, односно имплементира Тагучијев начин размишљања.

Нова технологија квалитета која је заснована на идејама Тагучијевих метода је први пут примењена у америчкој аутомобилској индустрији у марту 1982. У почетку су ове активности подстицане у оквиру Форд-ових агресивних настојања да побољша квалитет и смањи трошкове. Међутим, као последица тих напора дошло је до фундаменталних промена у америчким методама пројектовања и контроле квалитета које су утицале на измене у пословању великог броја америчких компанија.

Применом Тагучијевих метода америчке компаније су направиле шест веома битних промена у пословању. Промене се односе на:

1. дефиницију квалитета,
2. систем финансијског управљања,
3. пројектовање циљних вредности,
4. побољшање производног процеса,
5. хоризонталне техничке интеракције и
6. индустријске стандарде.

1. Дефиниција квалитета

Најважнија промена у америчким компанијама која је настала као последица примене Тагучијевих метода је поновно дефинисање квалитета и побољшање квалитета. При пројектовању параметара најбитније је смањити трошкове смањењем варијабилности, па се дефиниција квалитета не може ограничити на усаглашеност са спецификацијом. Под побољшањем квалитета се више не подразумева решавање проблема, већ смањење варијабилности, односно одступање од циљних вредности. У Сједињеним америчким државама се оцена побољшања квалитета одређује на основу годишњих уштеда у трошковима. Пројектовање параметара веома брзо доводи до побољшања квалитета, тако да није потребно вршити мерење квалитета кроз његово побољшање, већ је довољно пратити смањење трошкова.

Примена Тагучијевих метода у америчкој индустрији је дала добре резултате. Обављене су хиљаде истраживања и написани бројни радови. При квантитативној процени резултата истраживања резултати су обично били анализирани на основу годишњих уштеда у трошковима. На пример, од марта 1983. године корпорација "International telephone and telegraph" је обучила 1200 својих инжењера који су извршили више од 2000 истраживања која су омогућила уштеду од 35 милиона

америчких долара. Компанија "Flex Products" је са само дванаест обучених инжењера и 75 спроведених истраживања остварила уштеду од око 1,4 милиона долара.

У почетку примене метода у неким компанијама се јављао отпор према истраживања због трошкова и прекида производње до којих долази због извођења експеримената. Велики део уштеда се директно преноси на купца, што омогућава компанијама које користе ову методу да буду конкурентније и тиме остваре веће тржишно учешће.

2. Систем финансијског управљања

За увођење функције губитка квалитета (QLF – Quality loss function) Тагучи је добио престижну "Демингову награду". Функција губитка квалитета ствара економску перспективу која даје нову дефиницију традиционалних смерница за управљање трошковима. На основу традиционалне америчке дефиниције квалитета (усаглашеност са спецификацијама), поменуте смернице онемогућавају увођење побољшања свуда где су, на пример, карактеристике дела производа у оквиру толеранција датих на цртежу. Применом функције губитка квалитета је онемогућено квантитативно изражавање годишњих уштеда у трошковима у функцији побољшања карактеристика производа усмерених ка достизању циљних вредности, чак и када се наведена побољшања остварују у оквиру дефинисаних спецификација. На овај начин се подстичу континуална побољшања као најбољи метод за смањење трошкова. На пример, стручњаци америчког произвођача пнеуматика "General tire" су покушали да побољшају своје производе са аспекта конусности и тако смање трошкове. Коришћењем Тагучијеве функције губитака за анализу интерних губитака према критеријуму сортирања, у поређењу са губицима према критеријуму дисперзије, они су израчунали да би потенцијалне уштеде биле три пута веће од уштеда које су евидентирали кроз њихов систем управљања трошковима. Тагучијева функција губитка квалитета даје читав низ могућности за смањење трошкова кроз побољшање квалитета.

3. Пројектовање циљних вредности

Да би пројектовање параметара дало резултате, функција планирања и пројектовања производа мора да успостави циљне вредности како би се задовољиле потребе купца. Граничне вредности у спецификацији или толеранције које теоретски представљају потребе пројектовања више нису прихватљиве. Потребно је користити податке који су добијени маркетингом и пројектних знања да би се дошло до циљних вредности које су на оптималном нивоу са аспекта функције, погодности за употребу или спољашњег изгледа. После успостављања циљних вредности, функција пројектовања мора да оптимизује пројекте производа у раној фази развоја производа, нарочито када постоје међусобно супростављени захтеви. Примена ове методе доводи до значајних промена у начину пројектовања у много компанија.

4. Побољшање производног процеса

Систем производње може бити значајно унапређен применом Тагучијевих метода. Традиционално мишљење о квалитету је да су делови производа који су у границама спецификације усаглашени делови и да се у том случају ништа друго не захтева. У компанијама које примене методе пројектовања параметара и линијску контролу квалитета долази до позитивних промена.

Ове промене обухватају следеће:

- континуална побољшања кроз смањење варијабилности (описана у тачки 1.),
- нове смернице за побољшање процеса обезбеђења средстава,
- мање ослањање на контролне карте и анализу способности процеса.

Традиционално контролисање квалитета помоћу контролника “задовољава”/“не задовољава” је замењено анализом циљева или такозваних оптималних вредности. Овом променом се активности функције квалитета преусмеравају са решавања проблема на смањење варијабилности. Многе компаније улажу средства у нове процесе или алате без оптимизације старе опреме. Новим смерницама је предвиђена оптимизација постојеће опреме пројектовањем параметара пре него што се одобри пројекат за набавку нове или модерније опреме. У неким корпорацијама је измењена пословна политика, па је забрањено трошење новца на нову опрему све док се постојећа опрема не побољша применом Тагучи метода. Компаније које су примениле контролу квалитета на производној линији су смањиле потребу за активностима статистичког управљања процесом (SPC – Statistic process control) и преусмериле своје напоре са контроле квалитета на смањење трошкова.

5. Хоризонталне техничке интеракције

Традиционална метода која предвиђа расподелу проблема на организационе целине које су најодговорније за њихово решавање и припрему извештаја о статусу корективних мера једноставно не функционише. Његовом применом се само изазивају емоционалне интеракције и подстичу међусобна оптуживања. Компаније које спровode тимску обуку за примену Тагучијевих метода уз практично обављање истраживања и представљање резултата доживљавају интензивнију хоризонталну интеракцију. Овај поступак представља најмоћнију интерну промену са циљем максимизирања побољшања квалитета и смањења трошкова.

6. Индустијски стандарди

Тагучијеве методе имају тенденцију стандардизације и унапређења нове технологије квалитета. Већина јапанских и неколико америчких компанија користи технику такозваног преношења квалитета на све функције (QFD - Quality function deployment), као хоризонтални механизам за идентификовање супростављених пројектних захтева где је примена Тагучијевих метода од велике користи. Јапанско удружење за стандардне је увело општа правила за дефинисање толеранција на сродним компонентама на основу аспеката трошкова дисперзије, способности процеса и вредности односа “S/N”.

9. ПОЛИМЕРНИ МАТЕРИЈАЛИ (ПЛАСТИКЕ)

Вештачке (синтетичке) материје које имају аморфну макромолекуларну структуру чине велику групу конструкционих материјала који се називају пластике [13]. Пластике (полимерни материјали) имају широку примену и стално се производе нови типови полимера. У табели 9.1 дате су ознаке најчешће коришћених врста полимерних материјала.

Табела 9.1 Ознаке полимера

Полимери	Ознака
Полиетилен	PE
Полипропилен	PP
Полистирен	PS
Поливинилхлорид	PVC
Поливинилдехлорид	PVDC
Полиетилентерефталат	PET
Полиамид	PA
Поликарбонат	PC
Полиуретани	PU

9.1 Историјат

Људска цивилизација је прошла кроз неколико "доба" од којих се свако може идентификовати са неким од материјала који је био у употреби. Тако је постојало камено доба, па бронзано и гвоздено доба. Сада се човечанство налази у "мултиматеријалном добу" [14]. Широко распрострањена употреба различитих материјала у индустрији довела је до бројних истраживања и значајних резултата. Посебно су значајни вештачки полимерни материјали, који се не сматрају само заменом, чак сурогатом, за природне материјале попут дрвета, природних смола и влакана, већ се посматрају као посебна група материјала са својим сопственим карактеристикама.

Да би се установили зачеци полимерних материјала као индустријских производа, потребно је вратити се у 1843. годину када је малајски хирург др Монтгомери известио да Малајци користе гутаперку (у ствари коагулисани латекс неких малајских дрвета) за прављење дршки за ножеве и других употребних предмета. Након тога је формирана компанија за производњу албума за слике, мастионица и билијарских кугли. Отприлике у исто време Алфред Крицлоу развија нови производ, смешу сламене пулпе и гутаперке, пресовану са шелаком, од које су прављена дугмад, коцкарски реквизити и предмети за личну употребу, али још увек у врло ограниченом обиму. Његова фирма,

Pro-phy-lac-tic Brush Company, још увек се налази у месту Флоренс у Масачусетсу, где је он направио пресе и калупе за пресовање смеше шелака и гутаперке.

Индустрија полимерних материјала је 1909. године начинила нови значајан корак напред када је др Лео Хендрик Бекеланд, после многих експеримената, успео да добије контролабилну реакцију између фенола и формалдехида. Многи други истраживачи су покушавали да комбинују ове материјале, али нису успевали да добију употребљив производ. Др Бекеланд се посветио решавању проблема фенолских смола и након четири године открио је значај хексаметилентетрамина (уротропина) као катализатора и неопходност притиска за заустављање пенушања. Добијени материјал, назван бакелит по свом проналазачу, био је прва синтетичка смола и представља зачетак индустрије синтетичких пластичних материјала.

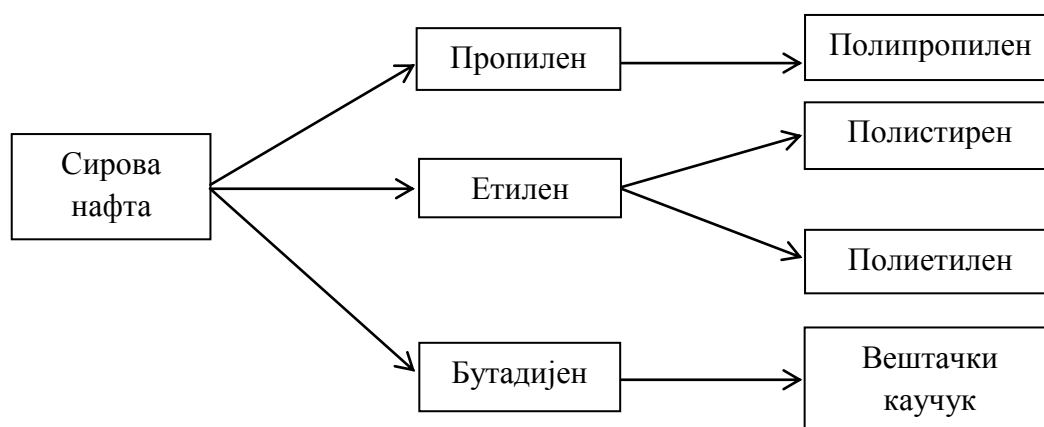
Године 1953. др Карл Циглер је пронашао процес за производњу полиетилена коришћењем титанијумтетрахлорида и триетил-алуминијума као катализатора. Овај процес није захтевао високе притиске за извршење реакције. Као резултат добијен је материјал веће густине, који је допуштао дување пластичних предмета тањих зидова, те је до 1959. већ пет фабрика производило боце за детерџент од овог материјала. Екструдовани полиетиленски филм је почео да се производи још 1945. године, али је био слабе провидности, крт и било је тешко штампати текст или слику на њему.

Од шездесетих година двадесетог века почиње убрзани развој полимерних материјала и они постају веома важни за индустрију.

9.2 Добијање полимера и особине

Органске сировине за израду пластика могу бити биљног или животињског порекла. Из оваквих сировина се производи добијају из фракција сирове нафте високе температуре кључања, тако што се фракције загревају под високим притиском и при високој температури, па настаје распад великих молекула (макромолекула) на мање погодне за индустрију вештачких производа.

На слици 9.1 [13] дате су врсте полупроизвода и финалних производа који се добијају из сирове нафте.



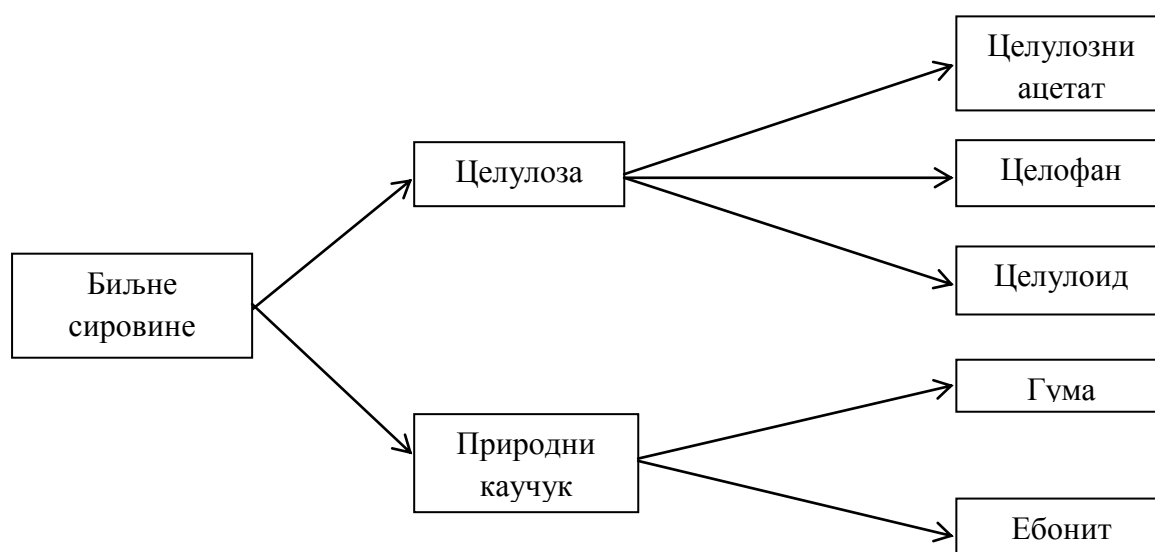
Слика 9.1 Шема производа који се добијају из сирове нафте

Осим сирове нафте, данас се све више користи као хемијска сировина и земни гас који у свом саставу има метан (скоро 90%), као и етан, пропан, бутан, пентан, хексан и њихови изомери, као и CO_2 , H_2 , CO , N_2 , H_2S и други. Земни гас се прерађује

непотпуним сагоревањем или термичким разлагањем (пиролизом при око 700°C). Непотпуним сагоревањем настаје ацетилен, као и мешавина CO_2 и H_2 погодна за синтезу уреје (карбамида) и амонијака. Пиролизом се добија етилен, пропилен, ацетилен и друга једињења која се користе за даљу хемијску синтезу.

Из угља се добијају разна једињења коришћењем суве дестилације (коксовања). Сува дестилација се заснива на загревању угља без присуства ваздуха при високој температури $1100\text{--}1300^{\circ}\text{C}$ и у том процесу настају разне смоле и чврсти производи (кокс).

Поред минералних сировина у индустрији полимерних материјала употребљавају се биљне и животињске сировине од којих се добијају финални производи приказани на слици 9.2.



Слика 9.2 Шема добијања производа од биљних и животињских сировина

Назив пластичне масе (пластике) потиче отуда што су у некој фази оне биле деформабилне. Код једних врста пластика деформабилност се стално задржава а производи се могу рециклирати, док се код других деформабилност трајно губи при завршној преради (дуропласти).

Термопластични материјали (термопласти) омекшавају под дејством топлоте, а при хлађењу опет отврдњавају. Супротно од њих термореактивне пластике (дуропласти) отврдњавају при загревању и добијају трајан облик. Примери термопласта су: полистирен, полиетилен, најлон, плексиглас, тефлон, а дуропласта бакелит, гума, силикон, епокси смоле. Термопласти нису отпорни на повишеним температурама (изузетак је тефлон), док дуропласти не горе већ се на довољно високим температурама угљенишу и разграђују (деградирају).

Температура топљења пластика је знатно нижа него већине метала, док неке од њих пузају и при собној температури. Зато се код неких пластика особине мењају и при малим температурским варијацијама. Слично као метали и полимерни материјали се прво деформишу еластично па затим пластично. Што је пластика мекша, имаће мању границу еластичности, а веће процентуално издужење (дуктилност). Повећање брзине деформисања, као и пад температуре доводе до преласка пластике из дуктилног у крто стање. Већи је утицај температуре, па ће њеним снижењем пластике прећи у крто стање, иако се прерађују малим брзинама деформисања.

Добра својства полимера су [15]:

- мала густина,
- лако обликовање,
- отпорност према хемикалијама,
- отпорност према корозији,
- изолатори су топлоте и електрицитета,
- пригушују звук и
- лако се боје.

Лоша својства полимера су:

- мала чврстоћа,
- димензионална нестабилност,
- мала отпорност на топлоту (лако су запаљиви) и
- имају склоност старењу и разградњи.

9.3 Врсте полимерних материјала

Према начину прераде, полимери се деле на термопластичне и термостабилне [15].

Термопластични материјали при загревању омекшају, тако да се могу прерађивати и обликовати, а након хлађења поново очврсну. Поступак загревања и хлађења може се поновити више пута. Међутим, уколико се прекорачи одређена температура, долази до непожељних хемијских реакција, а тиме и знатне промене својстава полимера. Термопластични полимери имају малу топлотну постојаност и малу тврдоћу, а неки од њих релативно малу отпорност на деловање хемикалија, посебно киселина. Најпознатији полимери ове врсте су: полиетилен, поливинилхлорид, полистирен, полипропилен. Термопластични полимери имају линеарну структуру макромолекула.

Термостабилни полимери после загревања и хлађења неповратно очврсну у нетопив полимер. Ова својства настају као последица хемијских реакција умрежења које настаје код загревања. Имају већу чврстоћу, тврдоћу и бољу топлотну постојаност него термопластични полимери, а отпорни су према хемикалијама.

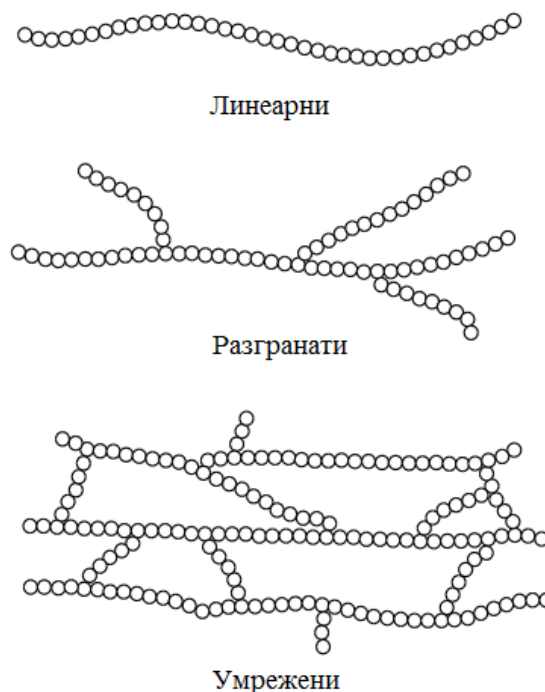
Најпознатији термостабилни полимери су: епоксиди, фенолформалдехиди, полиестер. Термостабилни полимери имају умрежену структуру макромолекула.

Према структури полимери могу бити линеарни, разгранати и умрежени (слика 9.3).

Линеарни полимери настају повезивањем мономера у један континуиран низ или ланац, тако да је сваки мер повезан само са два суседна мера.

Разгранати полимери имају на неке од мера у главном ланцу везане краће бочне ланце.

Умрежени полимери имају тродимензионалну просторну структуру. Састоје се од дугачких ланаца који су међусобно повезани попречним краћим ланцима.



Слика 9.3 Општи макромолекуларни изглед полимера

9.4 Структура полимера

Познавање структуре полимера је од изузетног значаја, јер она може имати изузетан утицај на већину својстава полимерних материјала. У проучавању структуре полимера постоје два прилаза. У првом, који најчешће користе хемичари, разликују се следећи структурни нивои [14]:

1. примарна структура макромолекула обухвата хемијски састав, начин повезивања атома и основних мотива у молекул полимера и његову конфигурацију (примарна структура се директно одражава на неке карактеристике као што су растворљивост и хемијско понашање полимера);

2. секундарна структура представља усаглашеност макромолекула што подразумева различите облике молекула;

3. терцијарна структура представља скуп од два или више елемената секундарне структуре;

4. квартерна молекулска структура се добија удруживањем два или више терцијарних агрегата.

Пример структурне формуле мономера етилена је приказана на слици 9.4.



Слика 9.4 Структурне формуле а) мера, б) мономера, в) полимера

По другом, физичком прилазу, код структуре полимера се разликује молекулска и надмолекулска структура. Молекулска структура подразумева:

- релативну молекулску масу:
 - средњу бројну молекулску масу и
 - средњу масену молекулску масу,
- састав,
- просторни распоред (конфигурацију) макромолекула.

Састав макромолекула је условљен понављајућим јединицама. Када су макромолекули изграђени само од једне врсте понављајућих структурних јединица, онда су то хомополимери. Ако су макромолекули изграђени од две или више врста понављајућих јединица, онда су то кополимери. Понављајуће јединице или групе понављајућих јединица у кополимерима могу бити сложене (низане) на различите начине па се разликују:

- кополимери са статистичком (насумичном) расподелом понављајућих јединица,
- наизменични (алтернирајући) кополимери,
- блок-кополимери и
- калемљени (графтовани) кополимери.

9.5 Додаци

Карактеристике квалитета полимера су условљене врстом мономера и условима полимеризације и могу се мењати хемијским реакцијама (умрежавањем) или физичким поступцима [16]. При томе се добијају полимери сличних или различитих карактеристика квалитета. Карактеристике полимера је могуће променити и са релативно малим количинама додатака (адитива). Добијени производи се називају полимерним материјалима. Додаци се мешају са полимерима у циљу добијања полимерних материјала побољшаних карактеристика, а омогућава се лакша прерада и употреба.

Ефекат деловања у полимерним материјалима је условљен расподелом додатака. Пожељна је што правилнија расподела, а она је условљена:

- физичким стањем и карактеристикама при топљењу полимера,
- физичким стањем и количином коришћеног додатка,
- жељеним физичким обликом полимерног материјала и
- жељеним степеном дисперзије додатка.

У зависности од наведених услова, додаци се могу уградити у полимерни материјал на следеће начине:

- растварањем,
- формирањем суспензије,
- мешањем флуида високог вискозитета,
- мешањем паста и стопљених полимера и
- мешањем чврстих честица.

Према функцији, додаци се могу поделити у неколико група:

- додаци који побољшавају и олакшавају прераду (топлотни стабилизатори, мазива, одељивачи, регулатори вискозности и суперпластифицирани додаци),
- модификатори механичких карактеристика (пластификатори, додаци за повећање жилавости, пуниоци, ојачивачи, додаци за умрежавање),

- модификатори површинских карактеристика (спољашња мазива, регулатори адхезивности, додаци за смањење приањања - лепљења филма у намотају, додаци за побољшање приањања),
- модификатори оптичких карактеристика (пигменти боје, структуризатори),
- додаци за повећање постојаности (светлосни стабилизатори, антиоксиданти, биоциди, средства против глодара),
- остали додаци (додаци за смањење горивости, средства за пењење, средства за усклађивање деловања пунилаца, метални деактиватори, дезодоранси и други).

Топлотни стабилизатори се додају полимерима ради смањења непожељног деловања повишених температура приликом прераде.

Мазива су додаци којима се смањује трење ради смањења површинског трошења и адхезије (спољашња мазива) и олакшавање прераде (унутрашња мазива).

Одељивачи су додаци који спречавају лепљење полимера за металне површине и олакшавају вађење производа из калупа, чиме скраћују процес прераде код бризгања. Најчешће су то: стеарати, органофосфати, воскови и силиконско уље.

Пластификатори (омекшивачи) су материје које се додају пластомерима ради повећања флексибилности и омогућавања лакше прераде. Они донекле утичу и на промену других физичких карактеристика. Обично смањују чврстоћу, постојаност добијених облика, топлотну стабилност и отпорност на деловање растварача.

Ударна жилавост пластомера повећава се додатком пластификатора, али се тиме смањује њихова чврстоћа. Да би се повећала жилавост без знатнијег смањења чврстоће потребно је створити двофазни систем у којем се осим пластомера, налази и еластомерна компонента.

Пуниоци су фино дисперговани, прашкасти, плочасти или лоптасти додаци и кратка влакна и они се додају полимерима у релативно малим количинама (од 5% до 25%). Помоћу њих се могу мењати и побољшавати различите карактеристике полимера, чврстоћа, тврдоћа, жилавост, течљивост, електрична проводљивост, способност топлотне изолације, постојаност облика готовог производа, отпорност на корозију итд., односно може се смањити цена полимерног материјала. Тако на пример, додатком калцијумкарбоната (креда, доломитно брашно) појефтиније различите пластомерне производе, повећава ударну жилавост, а поливинил хлориду повећава и самогасивост.

Ојачивачи се додају полимерима у врло великим количинама (до 80%) и на тај начин се битно мењају физичке карактеристике полимерних материјала, пре свега, чврстоћа.

Користи се још много врста додатака полимерима који овде нису поменути и стално се проналазе нове врсте додатака.

9.6 Механичка својства полимера

Укупна деформација код полимера износи [15]:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \quad (9.1)$$

где су: ε_1 – еластична деформација,

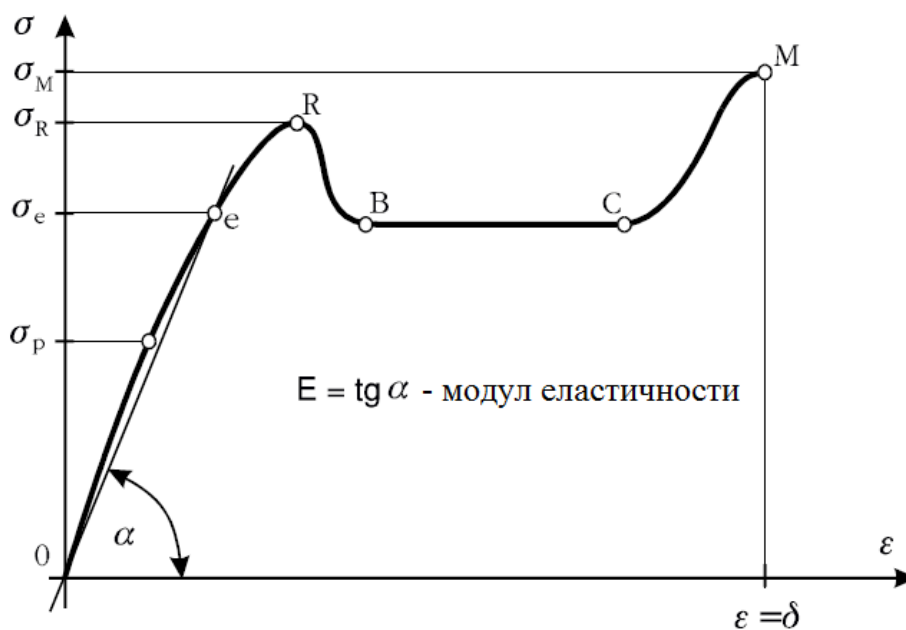
ε_2 – вискоеластична деформација и

ε_3 – вискофлуидна деформација.

Код полимерних материјала се испитују следећа механичка својства:

- а) однос напрезања и деформација (врши се испитивање на затезање, на савијање и на притисак),
- б) испитивање односа деформација - време ($\varepsilon - t$ дијаграм) и
- в) остала испитивања: испитивање трајне статичке чврстоће материјала, замора, тврдоће, хабања итд.

Општи облик дијаграма напон - деформације дат је на слици 9.5.



Слика 9.5 Дијаграм $\sigma - \varepsilon$ полимерног материјала

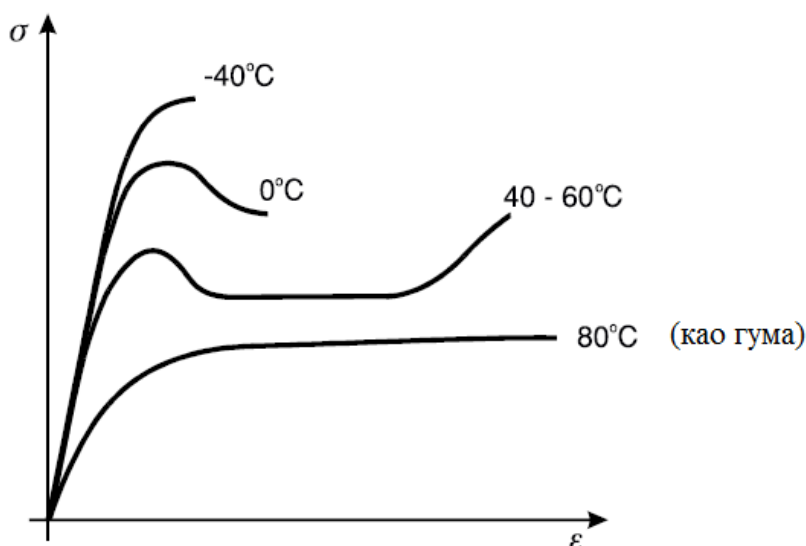
Ознаке на слици 9.5 имају следеће значење:

- σ_P - граница пропорционалности,
- σ_e - граница еластичности,
- σ_R - граница развлачења,
- σ_M - чврстоћа,
- (B - C) - пузање (хладно течење) и
- $E = \operatorname{tg} \alpha$ - модул еластичности.

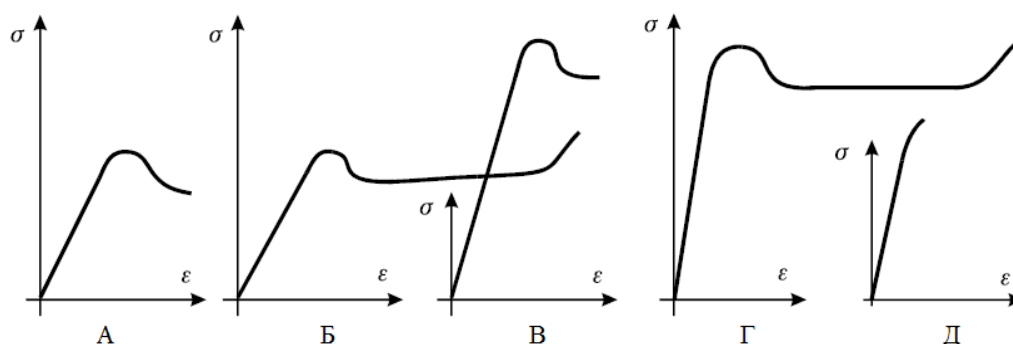
Један исти полимер се може различито понашати, у зависности од структуре молекула, надмолекуларне структуре, температуре, услова прераде, врсте и количине додатака. Пример је дат на слици 9.6. У табели 9.2 су приказани типови полимера и њихове особине а на слици 9.7 типови $\sigma - \varepsilon$ дијаграма.

Табела 9.2 Типови полимера

	Тип полимера	E	σ_R	σ_M	δ
A	Савитљиви и ломљиви	мали	мала	мала	умерено
Б	Савитљиви и дуктилни	мали	мала	умерена	велико
В	Крути и чврсти	мали	велика	велика	умерено
Г	Крути и дуктилни	велики	велика	велика	велико
Д	Крути и крти	велики	нема	умерена	мало



Слика 9.6 Понашање поливинил-хлорида у зависности од температуре



Слика 9.7 Типови $\sigma - \epsilon$ дијаграма полимерних материјала

9.7 Полиетилен

Полиетилен (Polyethylene PE) је једна од најкоришћенијих врста пластике. Откривен је случајно 1889. године, а прву индустријску примену доживео је 1939. године. Најчешће се употребљава за производњу амбалаже, кеса, торби, фолија, мембрана, резервоара, флаша итд.

Полиетилен представља макромолекуларни продукт полимеризације етилена, са степеном кристализације 55-92% зависно од методе добијања [17]. Према хемијској структури, полиетилен је најједноставнији полимер из групе полиолефима.

Полиетилен је термопластична пластична маса, без укуса и мириса, веома мале густине. Биолошки је "безопасан" и добрих је електро изолационих својстава.

Разликују се три врсте полиетилена и то:

- полиетилен ниске (мале) густине $0,91 - 0,92 \text{ g/cm}^3$ са степеном кристализације 55-67%, добија се методом високог притиска и високе температуре, због чега се често назива и полиетилен високог притиска.

- полиетилен велике густине $0,94 - 0,96 \text{ g/cm}^3$ са високим степеном кристализације 75-85%, добија се методом ниског притиска, због чега се назива и полиетилен ниског притиска.

- полиетилен средње густине $0,96 - 0,97 \text{ g/cm}^3$ са степеном кристализације 90%, назива се и полиетилен средњег притиска.

Полиетилен је термопластични полимер састављен од хидрокарбонских ланаца [18]. Зависно од молекуларне тежине тачка топљења полиетилена може да варира. У зависности од типа полимера тачка топљења полиетилена износи, за полиетилен високе густине (HDPE) 120-130°C, а за полиетилен ниске густине (LDPE) 105 - 115°C.

Већина LDPE, MDPE и HDPE полимера има одличну хемијску отпорност, што значи да раствори јаких киселина и база не утичу на ову врсту пластике. Такође је отпоран и на благе оксидансе. Полиетилен сагорева плавим пламеном и има благи мирис парафина. Приликом сагоревања полиетилен капље. Полиетилен се раствара на повишеним температурама у ароматичним хидрокарбонатима као што су толуен или ксилен, као и у растворима трихлоретана или трихлорбензена.

Основни молекул полиетилена је мономер – C_2H_4 , који се састоји од две CH_2 групе повезане двоструким везама. Због своје високе реактивности етилен се мора чувати у јако чистом стању у коме је стабилан.

Полимеризација етилена врши се додавањем катализатора. Конверзија у ланце полиетилена је високо егзотермичан процес, приликом кога се ослобађа велика количина топлоте. Као катализатор могу се користити метал - хлориди или метал - оксиди, најчешће титанијум хлорид.

За добијање полиетилена користе се два индустријска поступка:

- синтеза под високим притиском и
- синтеза под ниским притиском.

Код поступка са високим притиском етилен високе чистоће се компримује до притиска 150 - 300 МПа при температури од 300°C, у присуству кисеоника који служи као катализатор. Поступак при ниском притиску (0,2 - 0,5 МПа) изводи се уз присуство комплексног катализатора Ziegler-Natta.

Иако се полиетилен може рециклирати, полиетилен се најчешће производи из нафте или природног гаса.

Полиетилен налази примену у широком дијапазону производа за широку потрошњу. Велики број врста полиетилена је нешкодљив па има широку примену у прехранбеној индустрији. У облику пене се користи за ублажавање вибрација и изолацију. Полиетилен плута, тако да се користи и у наутици. Такође се користи за производњу делова за намештај, делова рачунара, електронских компоненти, производа за употребу у спорту, одећу, саобраћајних знакова, кугли за куглање, цеви под притиском итд.

10. ИСПИТИВАЊЕ

За потребе израде овог и дипломских (мастер) радова [19, 20], урађено је испитивање полиетилена типа Hostalen GC 7260 од кога се праве кошери за замрзиваче у фабрици 21. Октобар у Крагујевцу. Епрувете су направљене бризгањем на машини IDRA на температури 210°C и хлађене су у калупу 35 s. Епрувете израђене од овог материјала су испитиване на затезање на кидалици типа Zwick и подаци који су добијени су статистички обрађивани применом Тагучи методе.



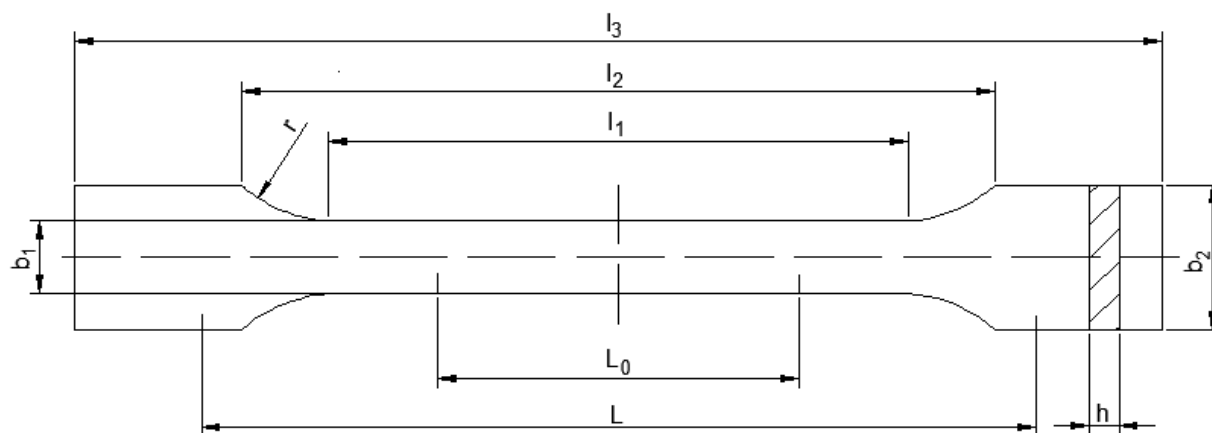
Слика 10.1 Машина за бризгање пластике

Основне особине материјала Hostalen GC 7260 су дате у табели 10.1 [21].

Табела 10.1 Особине материјала епрувета-Hostalen GC 7260

Густина	0,960 g/cm ³
Проток истопљене масе (190°C/2,16kg)	8,0 g/10 min
Проток истопљене масе (190°C/5,0kg)	23 g/10 min
Модул еластичности	1450 MPa
Напон киданја	30 MPa
Отпорност на жилавост по Шарпију (-30°C)	4,5 kJ/m ²
Отпорност на жилавост по Шарпију (23°C)	4,0 kJ/m ²
Тврдоћа по Шору (Shore D)	61
Тврдоћа мерена куглицом по Бринелу	58 MPa (H 132/30)
Температура омекшавања по Викерсу	74°C

Епрувете су стандардног облика и на слици 10.2 је дат приказ димензија епрувете.



Слика 10.2 Димензије испитиване епрувете

Ознаке на слици су:

- l_1 - дужина суженог дела 80 ± 2 mm,
- l_2 - дужина између паралелних страна 104 до 113 mm,
- l_3 - укупна дужина епрувете 150 mm,
- b - ширина суженог паралелног дела $10 \pm 0,2$ mm,
- b_1 - ширина суженог дела $10 \pm 0,2$ mm,
- b_2 - ширина крајева $20 \pm 0,2$ mm,
- h - дебљина $4 \pm 0,2$ mm,
- L - почетни размак између чељусти 115 ± 1 mm и
- L_0 - размак између мерних ознака $50 \pm 0,5$ mm.

Изглед епрувете при испитивању на кидалици је приказан на слици 10.3.



Слика 10.3. Епрувета при затезању

10.1 Карактеристике машине ZWICK

Назив:

Компјутеризовани мерни систем за испитивање материјала ZWICK/ROELL Z 100 (COMPUTERIZED MATERIALS TESTING MACHINE ZWICK/ROELL Z 100).

Машина је немачке производње и налази се у кабинету катедре за производно машинство.

Димензије носећег рама

Висина: 2369 mm

Ширина: 960 mm

Погонски систем, брзина и тачност

Брзина ($V_{\text{ном}}$): 0,0005 до 200 mm/min

Одступање изабране брзине: 0,003% $V_{\text{ном}}$

Мерење силе

Номинална сила ($F_{\text{ном}}$) 100 kN

Опсег мерења:

DIN EN ISO 7500-1 класа 1: 400.00 N до 100,00 kN

DIN EN ISO 7500-1 класа 0.5: 2.00 kN до 100,00 kN



Слика 10.4 Мерна машина ZWICK

10.2 Планирање експеримента

У овом експерименту је испитан утицај фактора на границу течења материјала и на промену попречног пресека епрувете. Фактори који су разматрани су: брзина затезања, температура хлађења и утицај воде.

Брзине затезања које ће бити разматране су одабране из стандарда ISO 527-1:1996 [22] и износе 50 mm/min, 100 mm/min и 200 mm/min. Брзине које је по стандарду могуће користити за испитивање затезањем су приказане у табели 10.2.

Табела 10.2 Стандардне брзине за испитивање затезањем

Ознака	Брзина, mm/min	Одступање, %
A	1 mm/min	± 60%
A ₁	2 mm/min	± 20%
B	5 mm/min	± 20%
C	10 mm/min	± 20%
D	20 mm/min	± 10%
E	50 mm/min	± 10%
F	100 mm/min	± 10%
G	200 mm/min	± 10%
H	500 mm/min	± 10%

Температуре хлађења епрувете су 0°C, –20°C и –40°C. Нула степени Целзијуса је температура замрзавања воде, –20 је температура на којој замрзивач ради и којој су изложени кошеви израђени од испитиваног материјала, а –40 гранична температура нормалне употребе полиетилена. Епрувете су хлађене тако што су потапане у воду (слика 10.5) и онда је у воду убачен вештачки снег (суви лед). Епрувете су хлађене на нижу температуру због загревања при стављању на кидалицу.



Слика 10.5 Епрувете у посуди (лево) и суви лед у јеленској кожи (десно)

Испитан је утицај воде тако што неке епрувете нису биле третиране водом, неке су биле третиране један дан (24 сата) док су остале биле третиране седам дана (168 сати). Епрувете су биле изложене утицају воде на тако што су биле потапане у посуду са водом и вађене после истека времена које је предвиђено експериментом.

Брзина затезања је обележена као фактор А, температура као фактор В и време третмана водом С. Као што је објашњено у претходном делу, сваки од ова три фактора има по три нивоа.

Фактор А:

$A_1 = 50 \text{ mm/min};$

$A_2 = 100 \text{ mm/min};$

$A_3 = 200 \text{ mm/min};$

Фактор В:

$B_1 = 0^\circ\text{C};$

$B_2 = -20^\circ\text{C};$

$B_3 = -40^\circ\text{C};$

Фактор С:

$C_1 = 0 \text{ h};$

$C_2 = 24 \text{ h};$

$C_3 = 168 \text{ h};$

Пошто је испитиван утицај три фактора који имају по три нивоа, изабрана је стандардна Тагучијева матрица L_9 . Матрица има девет редова, исто колико и експеримената и приказана је у табели 10.3 Сваки ред приказује једну комбинацију фактора, односно једну испитивану епрувету.

Табела 10.3 Матрица L_9

Број експеримента	Брзина, mm/min	Температура, °C	Време у води, h
1	50	0	0
2	50	-20	24
3	50	-40	168
4	100	0	24
5	100	-20	168
6	100	-40	0
7	200	0	168
8	200	-20	0
9	200	-40	24

10.3 Утицај посматраних фактора на напон на граници течења

Напон течења је једна од најважнијих величина за прорачун (димензионисање) машинских делова. Највећи ниво напона којим се део сме оптеретити мора бити нижи од напона течења, што се за одговорне делове дефинише степеном сигурности.

Граница развлачења или граница течења материјала (ознака: $R_{p0,2}$) је онај напон при затезућем оптерећењу које изазива знатно истезање испитиваног узорка или епрувете, без повећања силе. То је основно механичко својство материјала, уз затезну чврстоћу, на основу којег се материјали вреднују према њиховој механичкој отпорности. Граница развлачења за одређене материјале се добија из дијаграма напрезања.

Договорена граница развлачења (ознака: R_p) је онај напон у материјалу које ствара договорено продужење испитног узорка, а уобичајена је вредност трајно продужење од 0,2% првобитне дужине испитиваног узорка, па се таква граница развлачења означава $R_{p0,2}$. Резултати експеримента су приказани у табели 10.4.

Табела 10.4 Вредности напона на граници течења добијени експерименталним путем

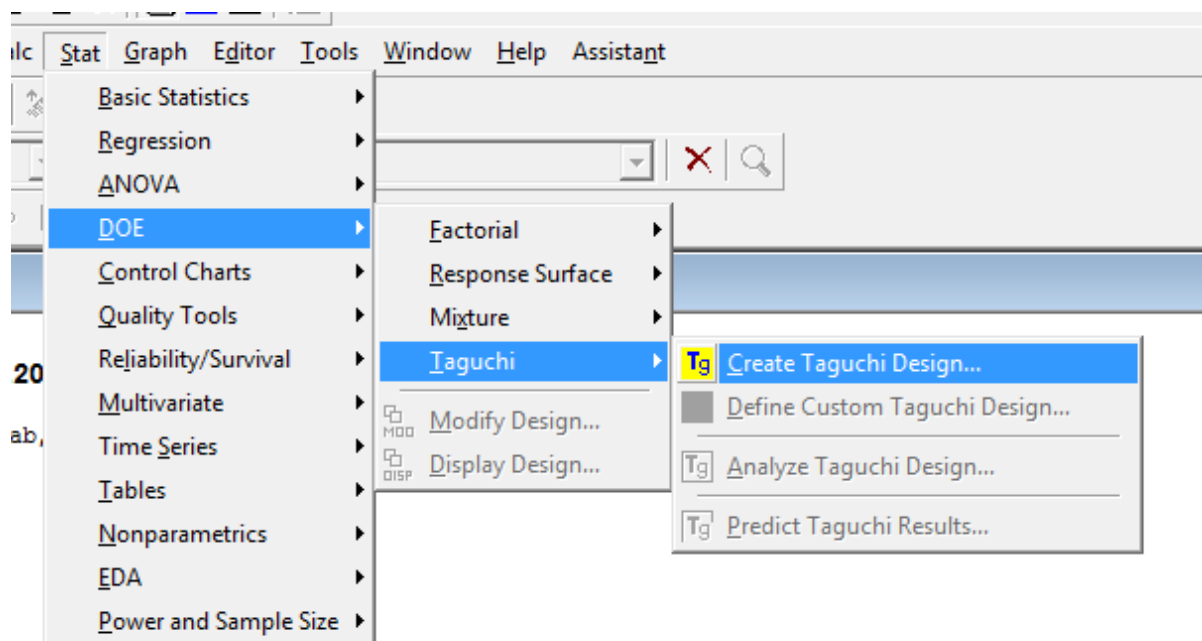
Број експеримента	Брзина, mm/min	Температура, °C	Време у води, h	$R_{p0,2}$, МПа
1	50	0	0	24,09
2	50	-20	24	25,84
3	50	-40	168	25,72
4	100	0	24	23,88
5	100	-20	168	24,98
6	100	-40	0	26,10
7	200	0	168	23,77
8	200	-20	0	24,82
9	200	-40	24	25,63

У овом раду статистичка обрада података је урађена помоћу статистичког програма Minitab 16 који има посебну опцију за обраду података Тагучијевим методама. Minitab 16 је специјализовани програм за статистичку обраду података и често се користи у научним истраживањима. Minitab 16 је веома практичан програм који је дизајниран 1972. године на државном универзитету у Пенсилванији. Програм су направила три универзитетска професора са жељом да се њихови студенти концентришу на учење основних концепата статистике, а не на прорачуне који су напорни и одузимају доста времена.

Данас преко четири хиљаде факултета користи Minitab у настави. Програм је приступачан, једноставан за коришћење, припрема студенте за ефикасно коришћење знања из статистике у привреди. Више студената учи статистику помоћу Minitab-а него било ког другог програма.

Програм има веома добре могућности за визуелизацију добијених резултата, интерфејс програма омогућава корисницима да брзо овладају програмом и да се фокусирају на знања из статистике. Програм садржи многе стандардне статистичке методе, поред Тагучијевих метода ту су и факторијални пројекти, анализа варијансе, метода најмањих квадрата као и методе квалитета (Парето дијаграми, мултиваријабилни дијаграми итд.) и многе друге статистичке методе.

На слици 10.6 приказан је начин бирања опције за Тагучијеве методе у Minitab-у. Потребно је изабрати опцију за планирање експеримената и одабрати Тагучијеве методе (DOE – Taguchi – Create Taguchi design).



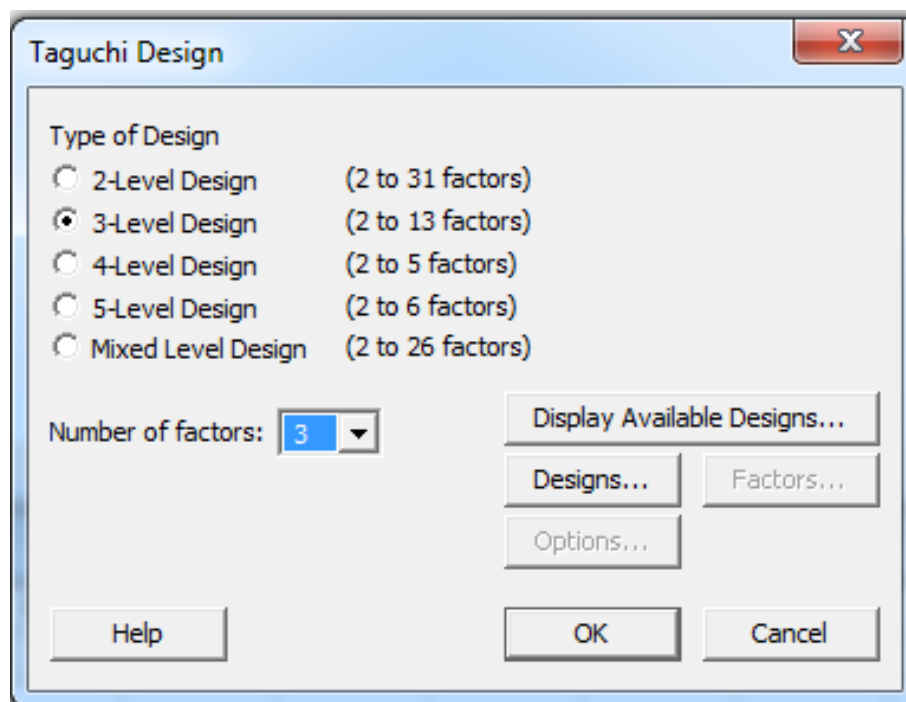
Слика 10.6 Начин бирања методе

После бирања опције за Тагучијеве методе потребно је дефинисати број нивоа и фактора Тагучијевог експеримента. На слици 10.7 приказан је начин бирања фактора и нивоа.

У прозору Taguchi Design су понуђене опције за врсту дизајна (Type of Design), у зависности од броја нивоа за сваки фактор. Понуђени нивои су:

- 2 Level Design (сваки фактор по два нивоа),
- 3 Level Design (сваки фактор по три нивоа),
- 4 Level Design (сваки фактор по четири нивоа),
- 5 Level Design (сваки фактор по пет нивоа) и
- Mixed Level Design (фактори имају различит број нивоа).

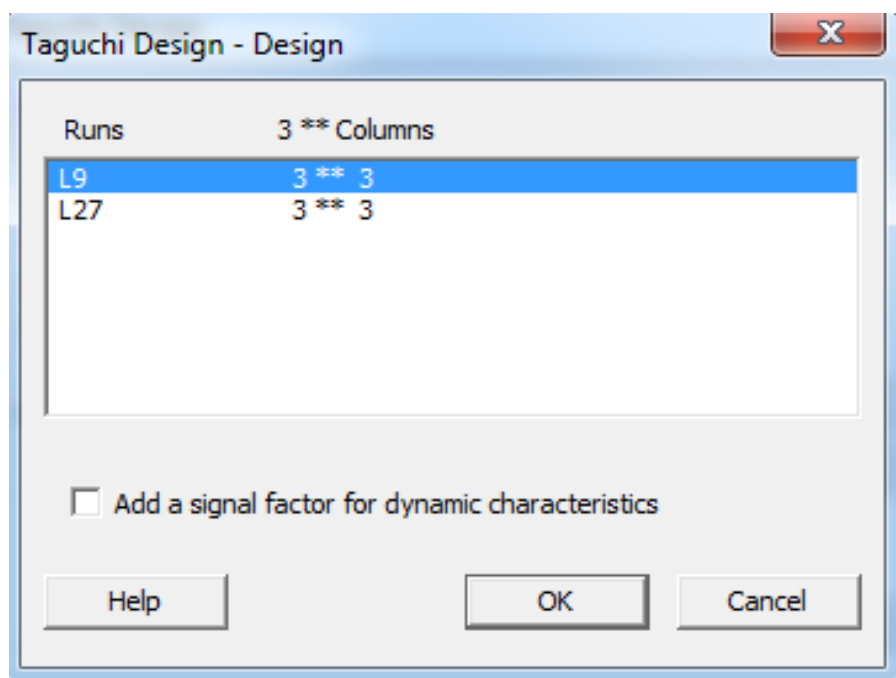
Експеримент који је урађен у оквиру овог рада има три фактора са по три нивоа. Овим је завршено дефинисање броја фактора експеримента и њихових нивоа.



Слика 10.7 Избор фактора у Minitab-у

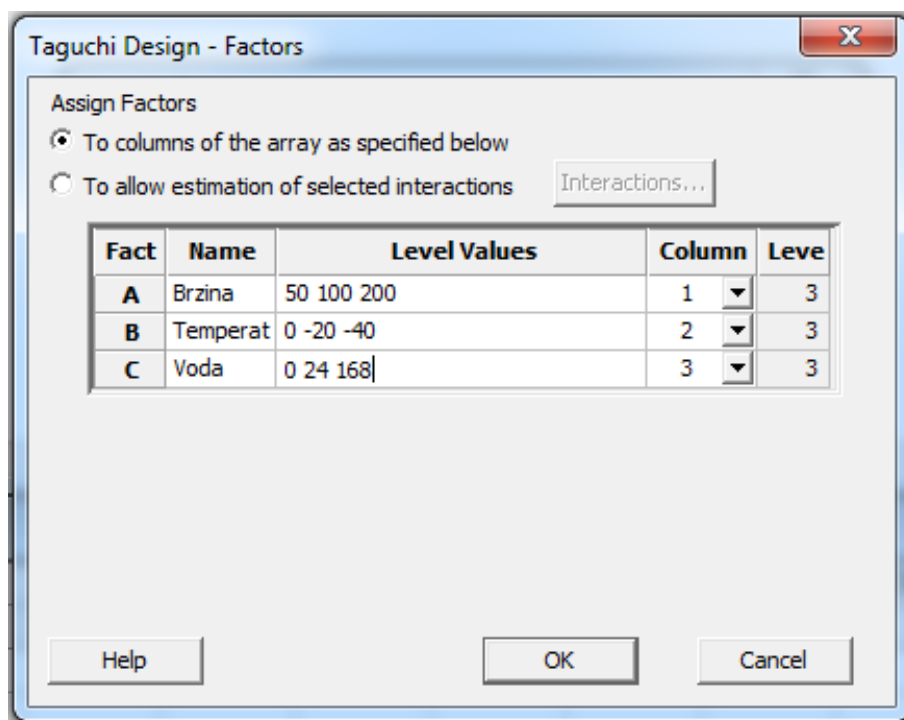
Начин дефинисања одговарајућих Тагучијевих матрица је приказан на слици 10.8. Бирањем опције Design отвара се прозор са слике (Taguchi Design – Design).

У зависности од броја фактора и њихових нивоа програм ће понудити стандардне матрице које могу бити коришћене. У овом случају су понуђене матрице L_9 и L_{27} а за дати експеримент је изабрана стандардна Тагучијева матрица L_9 .



Слика 10.8 Бирање стандардне матрице

Бирањем опције Factors могуће је подесити вредности фактора по нивоима и њихова имена. У овом случају фактори су брзина (50, 100, 200 mm/min), температура (0, -20, -40 °C) и време које су епрувете биле у води (0 h, 24 h, 168 h). На слици 10.9 је приказан изглед прозора где је потребно уписати вредности фактора.



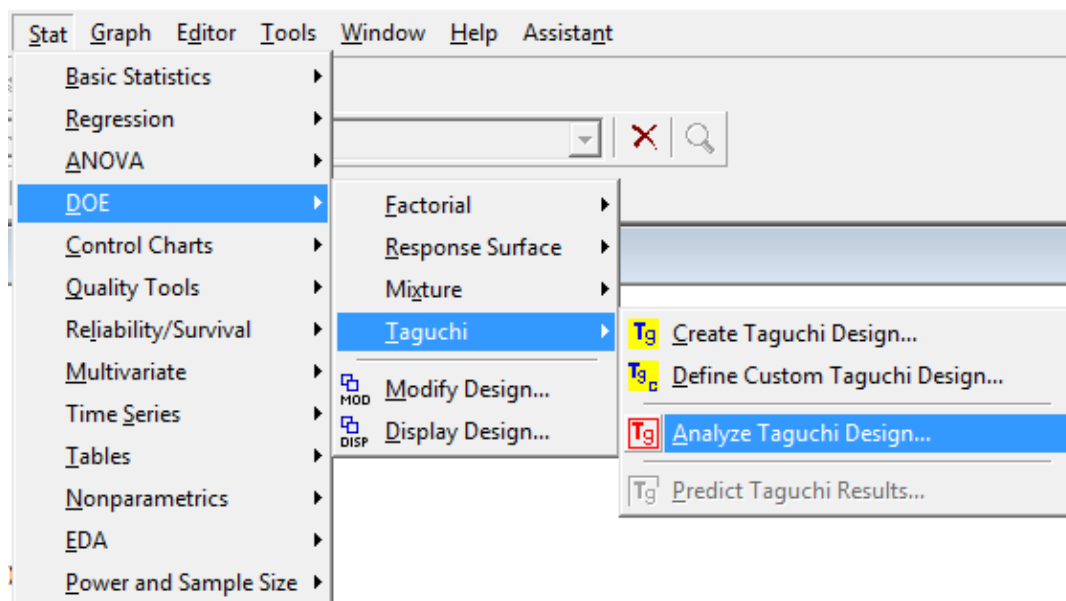
Слика 10.9 Избор фактора и нивоа

Програм ће формирати три колоне са вредностима фактора према правилима Тагучијевих метода. У четврту колону је потребно унети вредности одзива, у овом случају вредности напона на граници течења за дати експеримент. Изглед попуњене табеле је приказан на слици 10.10.

Worksheet 1 ***				
↓	C1	C2	C3	C4
	Brzina	Temperatura	Voda	Rp 0,2
1	50	0	0	24,09
2	50	-20	24	25,84
3	50	-40	168	25,72
4	100	0	24	23,88
5	100	-20	168	24,98
6	100	-40	0	26,10
7	200	0	168	23,77
8	200	-20	0	24,82
9	200	-40	24	25,63

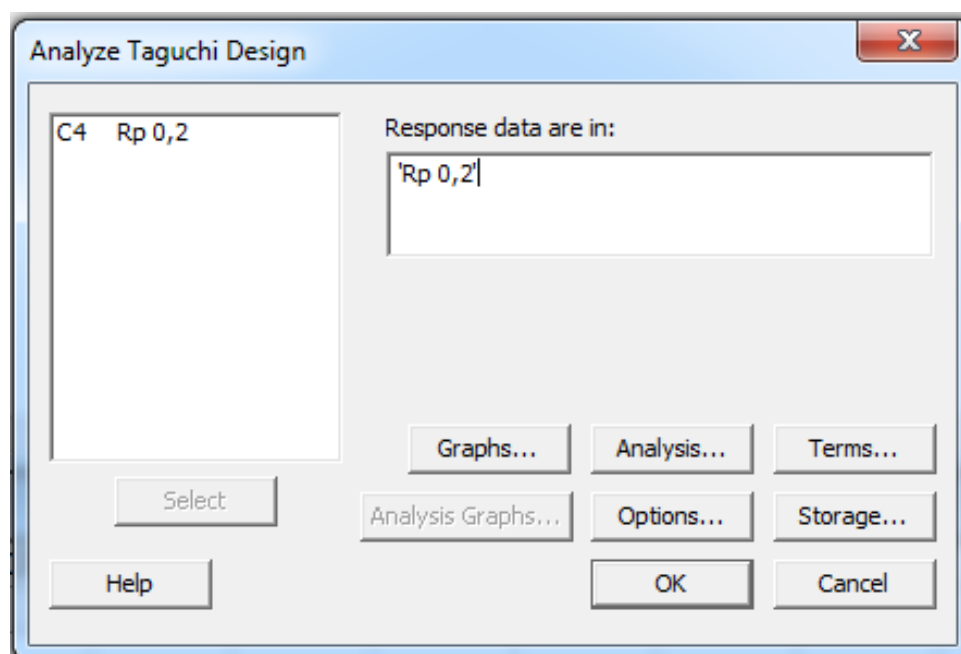
Слика 10.10 Изглед табеле у Minitab-у

После попуњавања вредности могуће је почети са обрадом података. Начин приступа опцији за анализу (DOE – Taguchi – Analyze Taguchi Design) је приказан на слици 10.11.



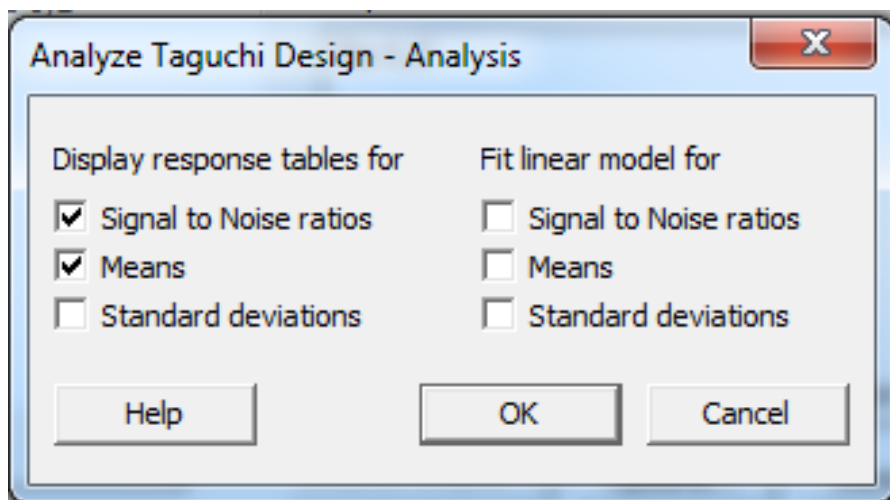
Слика 10.11 Приступ опцији за анализу података

После бирања опције за анализу резултата отвара се прозор Analyze Taguchi design као на слици 10.12. Ту је потребно дефинисати шта је одзив система. То се ради двоструким кликом на ознаку одзива на левој страни прозора. У овом случају је потребно одабрати да су одзиви система дати у колони $R_{p0,2}$.



Слика 10.12 Подешавање одзива

Бирањем опције Analysis отвара се прозор као на слици 10.13 и ту је потребно означити које ће резултате програм приказати табеларно. Могуће је приказати однос сигнал – бука (S/N), средње вредности одзива и стандардна одступања. У случају овог испитивања биће означени сигнал – бука (Signal to Noise ratios) и средње вредности одзива (Means) по нивоима.

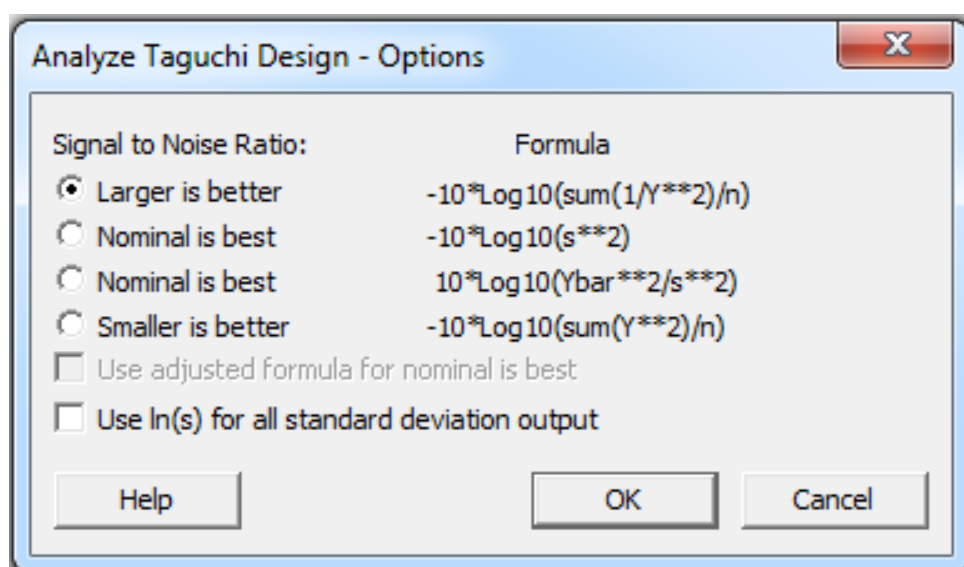


Слика 10.13 Бирање вредности за табеларни приказ

За бирање начина израчунавања одзива система потребно је отворити прозор опције (Options). Понуђени су начини:

- мање боље (Smaller is better),
- номинално најбоље (Nominal is best) и
- веће боље (Larger is better).

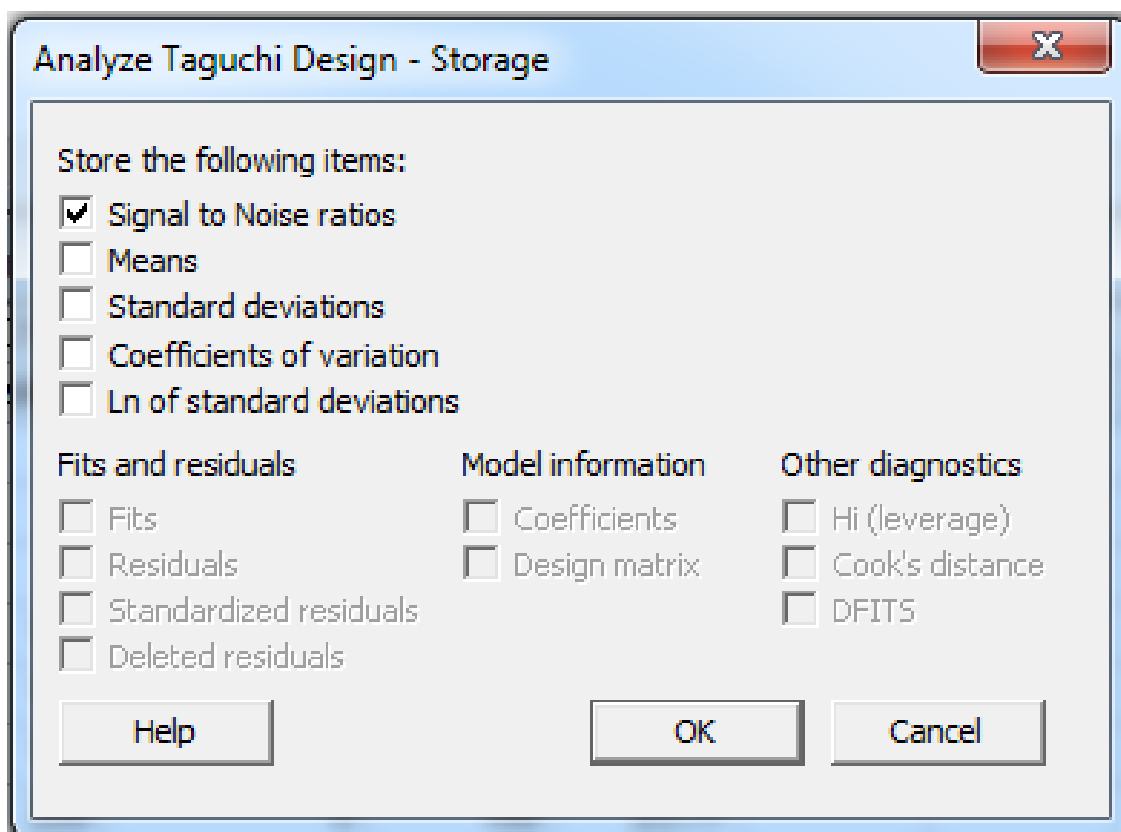
Примена начина израчунавања односа S/N је приказана у претходном тексту а пошто се у овом примеру анализира утицај фактора на напон на граници течења, узимајући у обзир технички значај ове величине и константну тежњу за повећањем механичких особина, примењен је начин веће боље (слика 10.14).



Слика 10.14 Бирање врсте односа сигнал – бука (S/N)

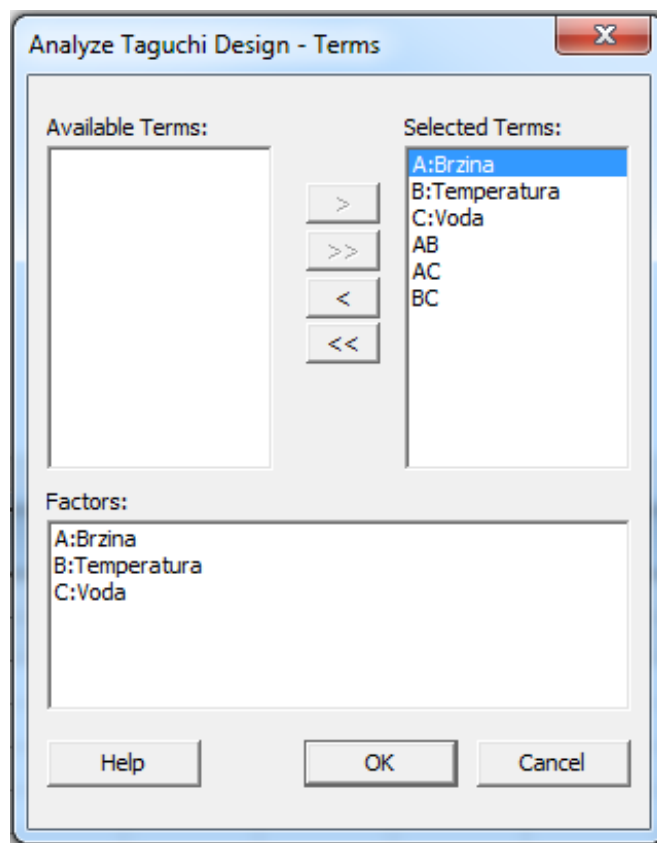
У прозору Storage је потребно обележити које вредности програм треба да израчуна. Вредности које програм помоћу ове опције може да израчуна су однос сигнал/бука (Signal to Noise ratios), средње вредности одзива (Means), стандардна одступања (Standard deviations) и коефицијент варијације (Coefficients of variation).

За овај пример је од значаја израчунавање вредности односа сигнал – бука. Изглед прозора је приказан на слици 10.15.



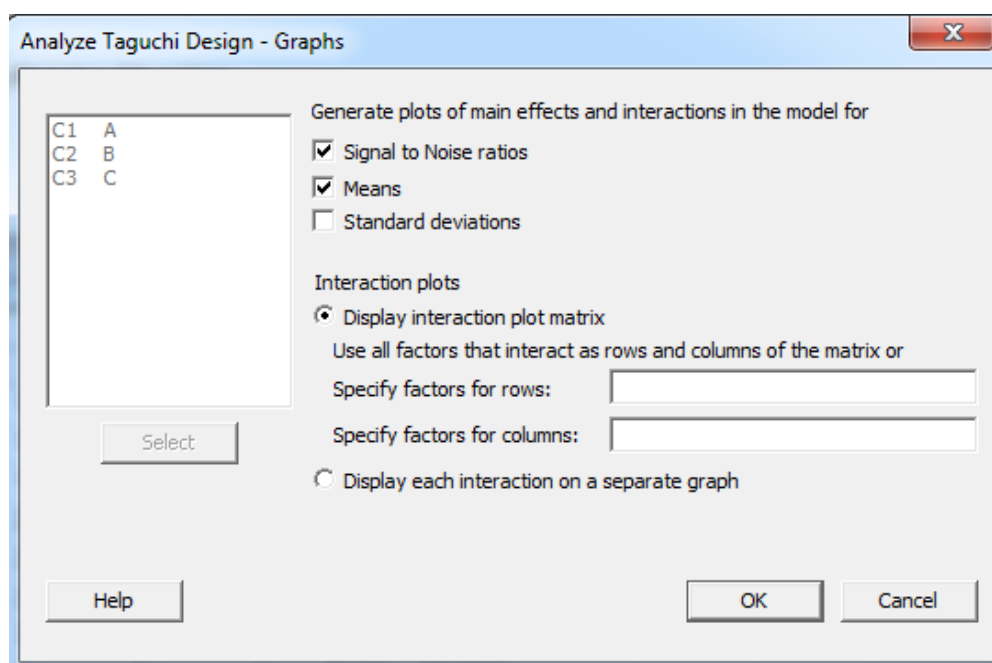
Слика 10.15 Избор вредности које ће бити израчунате

Да би програм узео у обзир све интеракције између фактора потребно је обележити све интеракције између фактора, као што је приказано на слици 10.16. Програм ће сам факторе А (брзина), В (температура) и С (утицај воде) ставити на десну страну у део прозора Selected Terms, док је за међусобне интеракције АВ, АС и ВС потребно означити их у прозору Available Terms и затим кликнути на стрелицу која је окренута ка десној страни, односно делу Selected Terms.



Слика 10.16 Бирање интеракција које имају утицај.

На слици 10.17 је приказан начин бирања вредности у опцији Graphs, које ће програм графички приказати. У овом примеру то су однос сигнал – бука и средње вредности одзива.



Слика 10.17 Бирање вредности које ће бити графички приказане

10.4 Резултати

Програм је израчунао однос сигнал – бука (S/N) за сваки експеримент као што је то објашњено. Вредност односа сигнал – бука (S/N) је израчуната помоћу обрасца:

$$S/N = -10 \cdot \log_{10}(1/(R_{p\ 0,2})^2) . \quad (10.1)$$

На пример, за први експеримент, вредност S/N односа једнака је:

$$(S/N)_1 = -10 \cdot \log_{10}(1/(24,09)^2) = 27,636736.$$

Образац (10.1) коришћен је за израчунавање вредности одзива за сваки експеримент појединачно. После тога одређене су средње вредности одзива за сваки ниво сваког фактора који ће бити предмет даље анализе.

Резултати добијени програмом приказани су у табели 10.5.

Табела 10.5 Табела са вредностима одзива преузета из Minitab – a

Brzina	Temperatura	Voda	Rp 0,2	SNRA1
50	0	0	24,09	27,63674
50	-20	24	25,84	28,24585
50	-40	168	25,72	28,20542
100	0	24	23,88	27,56069
100	-20	168	24,98	27,95185
100	-40	0	26,1	28,33281
200	0	168	23,77	27,52058
200	-20	0	24,82	27,89604
200	-40	24	25,63	28,17497

10.5 Анализа резултата

У табели 10.6 која је преузета из програма дате су средње вредности S/N односа по нивоима за сваки фактор. Примера ради, за фактор брзина и ниво један вредност се израчунава као аритметичка средина вредности одзива из табеле 10.5 који су реализовани са фактором брзина 50 mm/min. Пример израчунавања:

$$\text{Брзина 1} = \frac{27,63674 + 28,24585 + 28,20542}{3} = 28,029.$$

Табела 10.6 Средње вредности односа сигнал - бука S/N по нивоима фактора

Level	Brzina	Temperatura	Voda
1	28,03	28,24	27,96
2	27,95	28,03	27,99
3	27,86	27,57	27,89
Delta	0,17	0,67	0,10
Rank	2	1	3

Вредност делта (Delta) се израчунава као разлика највеће и најмање вредности односа S/N по нивоу једног фактора. За овај пример вредности делта су израчунате:

Делта (фактор брзина) = $28,03 - 27,86 = 0,17$.

Делта (фактор температура) = $28,24 - 27,57 = 0,67$.

Делта (фактор вода) = $27,99 - 27,89 = 0,10$.

На основу ових резултата се може закључити да највећи утицај на напон на граници течења има температура, а најмањи утицај вода, односно време provedено у њој.

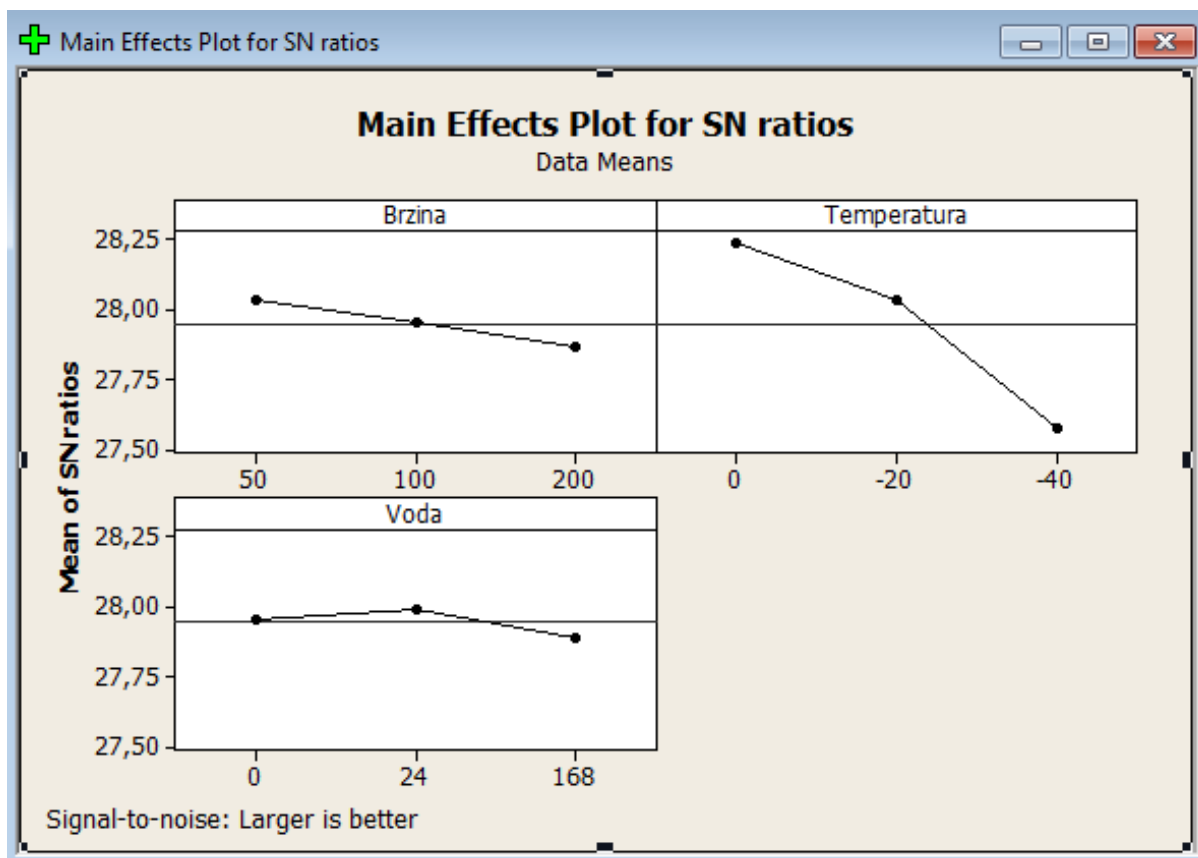
Из програма је преузета и табела 10.7 са средњим вредностима одзива за сваки ниво сваког фактора. На пример, за фактор температура и ниво два рачуна се сваки експеримент у коме је фактор температура на другом нивоу односно - 20°C, а то су експерименти 2, 5 и 8. Вредност је једнака:

$$\text{Температура 2} = \frac{25,84 + 24,98 + 24,82}{3} = 25,21333.$$

Табела 10.7 Вредности одзива $R_{p\ 0,2}$ по нивоима преузети из Minitab-a (Means)

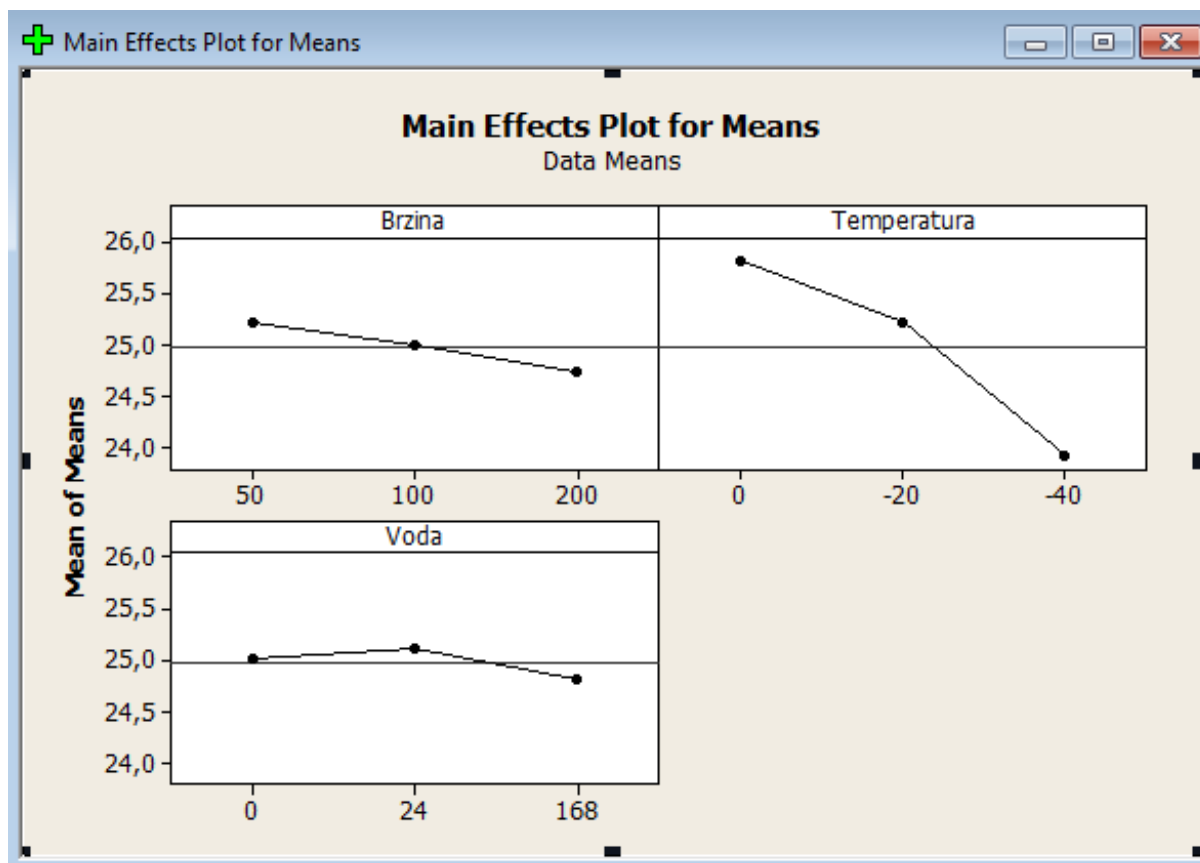
Level	Brzina	Temperatura	Voda
1	25,22	25,82	25,00
2	24,99	25,21	25,12
3	24,74	23,91	24,82
Delta	0,48	1,90	0,29
Rank	2	1	3

Графички прикази резултата који су добијени програмом Minitab су дати на сликама 10.18 и 10.19. На слици 10.18 је дат графички приказ за однос сигнал – бука а на слици 10.19 за вредности одзива.



Слика 10.18 Графички приказ за однос сигнал – бука (S/N)

Графички приказ на слици 10.18 је повезан са табелом 10.6 за средње вредности односа сигнал/бука. На пример, за фактор брзина, средње вредности односа сигнал/бука по нивоима су 28,03 за први ниво, 27,95 за други ниво и 27,86 за трећи ниво. Спајањем тих тачака добија се графички приказ за фактор брзина на слици 10.18. Прва тачка на апсциси има вредност 50 и на ординати 28,03, друга на апсциси има вредност 100, а на ординати 27,95 и трећа на апсциси има вредност 200 а на ординати 27,86. На потпуно исти начин добијају се прикази за остала два фактора, температуру и воду.



Слика 10.19 Графички приказ средњих вредности $R_{p\ 0,2}$ по нивоима фактора

Истим поступком као за слику 10.18 добија се слика 10.19 на којој је графички приказ средњих вредности $R_{p\ 0,2}$ по нивоима. Из табеле 10.7 се читају вредности по нивоима за сваки фактор и добијене тачке се спајају у график.

Фактори различито утичу на промену механичких карактеристика материјала. У табели 10.6 су приказани резултати који показују који фактор највише утиче на механичке особине испитиваног материјала. Јаснији показатељ утицаја сваког фактора је могуће добити применом анализе одступања (ANOVA). Поступак израчунавања процентуалног утицаја је приказан у наставку рада.

Средња вредност односа S/N се рачуна по обрасцу:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S/N)_i. \quad (10.2)$$

У обрасцу 10.2 n је број експеримената а $(S/N)_i$ вредност односа сигнал/бука за сваки експеримент појединачно.

У овом примеру средња вредност се добија као:

$$m = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 27,63 + 28,24 + 28,20 + 27,56 + 27,95 + 28,33 + 27,52 + 27,89 + 28,17$$

$$m = 27,94722$$

Сума квадрата за фактор А се рачуна као [7]:

$$СК = [(бр. експеримената за фактор A_1) \times (m_{A1} - m)^2] + [(бр. експеримената за фактор A_2) \times (m_{A2} - m)^2] + [(бр. експеримената за фактор A_3) \times (m_{A3} - m)^2] = [3 \times (28,03 - 27,94722)^2] + [3 \times (27,45 - 27,94722)^2] + [3 \times (27,86 - 27,94722)^2] = 0,043403$$

Сума квадрата за фактор В се рачуна као:

$$СК = [(бр. експеримената за фактор B_1) \times (m_{B1} - m)^2] + [(бр. експеримената за фактор B_2) \times (m_{B2} - m)^2] + [(бр. експеримената за фактор B_3) \times (m_{B3} - m)^2] = [3 \times (28,24 - 27,94722)^2] + [3 \times (28,03 - 27,94722)^2] + [3 \times (27,57 - 27,94722)^2] = 0,704603$$

Сума квадрата за фактор С се рачуна као:

$$СК = [(бр. експеримената за фактор C_1) \times (m_{C1} - m)^2] + [(бр. експеримената за фактор C_2) \times (m_{C2} - m)^2] + [(бр. експеримената за фактор C_3) \times (m_{C3} - m)^2] = [3 \times (28,24 - 27,94722)^2] + [3 \times (28,03 - 27,94722)^2] + [3 \times (27,57 - 27,94722)^2] = 0,015803$$

Укупна сума квадрата се рачуна помоћу обрасца:

$$SS = \sum_{i=1}^n ((S/N)_i - m)^2.$$

Вредност суме квадрата у овом случају једнака је:

$$SS = \sum_{i=1}^9 (27,63674 - 27,94722)^2 + (28,24585 - 27,94722)^2 + (28,20542 - 27,94722)^2 + (27,56069 - 27,94722)^2 + (27,95185 - 27,94722)^2 + (28,33281 - 27,94722)^2 + (27,52058 - 27,94722)^2 + (27,89604 - 27,94722)^2 + (28,17497 - 27,94722)^2 = 0,786863$$

Утицај сваког фактора Р(%) се рачуна као количник суме квадрата за дати фактор и укупне суме квадрата помножен са 100. Проценат утицаја се користи да истакне важност неког фактора. Иако се на основу табеле 10.6 фактори могу рангирати по својој важности на вредност одзива израчунавањем процентуалног утицаја све постаје јасније.

Утицаји фактора једнаки су:

$$\text{Утицај брзине} = 0,043403 / 0,786863 \cdot 100 = 5,515\%$$

$$\text{Утицај температуре} = 0,704603 / 0,786863 \cdot 100 = 89,545\%$$

$$\text{Утицај воде} = 0,015803 / 0,786863 \cdot 100 = 2,008\%$$

Резултати процентуалног утицаја фактора приказани су у табели 10.8.

Табела 10.8 Утицај фактора изражен процентуално

Фактор	Сума квадрата	P(%)
Брзина	0,043403	5,515
Температура	0,704603	89,545
Утицај воде	0,015803	2,008
Грешка		
Укупно	0,786863	100

Анализом резултата који су приказани у табели 10.8 закључује се да је температура фактор који највише утиче на механичке особине испитиваног материјала (89,545%), док је утицај остала два фактора доста мањи. То је користан податак за инжењере који ће испитивани материјал користити зато што ће на основу резултата испитивања знати на које факторе треба обратити посебну пажњу.

11. ЗАКЉУЧАК

У савременој индустрији тачне и правовремене информације су непходне за привредни успех. Због тога се у развијеним земљама много пажње, времена и средстава одваја за индустријске експерименте. Наука о експериментима стално напредује и заузима битно место у индустрији и на универзитетима.

Данас је неопходна употреба знања из статистике у индустрији. Статистика се користи од почетне фазе развоја производа, преко употребе у праћењу и анализирању производње и оцене квалитета производа.

Развојем тржишта и повећањем конкуренције борба за купце почиње да буде веома битна за произвођаче. Најбитнија карактеристика производа у тој борби је квалитет. Због тога су многи научници своју пажњу усмерили на унапређење система квалитета.

Један од гуруа квалитета, јапански инжењер др Геничи Тагучи, оставио је значајан траг у јапанској индустрији. Тагучијева дефиниција квалитета као губитка за друштво је срж његове идеје о унапређењу квалитета. Применом Тагучијевих метода многе компаније су значајно унапредили квалитет и пословање што потврђује исправност Тагучијеве филозофије. Конструисањем робусних производа могуће је обезбедити смањење утицаја спољашњих фактора на рад производа. Применом Тагучијевих метода могуће је оптимизирати експеримент, односно смањити број потребних експеримената што директно доводи до скраћења времена потребног за извршавање експеримента и смањења материјалних трошкова и тиме је могуће стећи предност на тржишту зато што информације о карактеристикама мање коштају и брже се до њих долази.

После великог успеха примене Тагучијевих метода у индустрији Јапана и Сједињених америчких држава утицај метода се проширио и на Европу. Објављено је много радова где је обрада резултата или одлучивање рађено уз помоћ Тагучијевих метода. Примери успешне примене метода се могу наћи у најразличитијим деловима друштва, у маркетингу, управљању обезбеђивању квалитета, конструисању робусних производа и других. У последње време на многим светским универзитетима Тагучијеве методе су нашле примену у триболошким испитивањима.

Успешне компаније воде рачуна о квалитету материјала од којих праве своје производе. Наука о материјалима стално напредује, стално се проналазе нове врсте индустријских материјала. Полимерни и композитни материјали сврставају се у новије материјале и испитивање њихових механичких особина има велики значај због сталне тежње за побољшањем механичких карактеристика материјала.

Испитивање које је урађено за потребе израде овог дипломског (мастер) рада показало је неке битне карактеристике полимерног материјала Hostalen GC7260, односно утицај фактора могућег радног окружења на механичке карактеристике. Испитивањем материјала, праћењем битне карактеристике напона на граници течења и обрадом резултата Тагучијевим методама закључено је да на напон на граници течења највише утицаја има температура.

Израчунавањем процентуалног утицаја фактора на изабрану карактеристику материјала долази се до тога да температура учествује са чак 89,54%, док брзина затезања и време проведено у води учествују са свега 5,5% и 2%. Ови резултати могу бити од користи инжењерима који ће користити Hostalen GC7260 као конструкциони материјал при конструисању производа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gunter B., A Perspective on the Taguchi Methods, Quality Progress, June 1987.
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Genichi_Taguchi, преузето 20.03.2014.
- [3] Вучетић Б., Секулић М., Факултет техничких наука, Нови Сад, Јурковић З., Технички факултет, Ријека Примена Тагучи метода у планирању експеримената, Зборник радова Технички факултет, Нови Сад
- [4] Jiju Antony, Making Your Industrial Experiments Successful - Some Useful Tips to Industrial Engineers, <http://www.qualityamerica.com/>, преузето 22.03.2014.
- [5] Ивић К., Маринковић Р., Јурковић З., Управљање променама применом Тагучи методе, Стручни рад, Економски вјесник, Осигек, No.1 Јул 2011.
- [6] Спасојевић К., Приказ Тагучијевих метода са примерима практичне примене, Дипломски рад, Машински факултет Крагујевац
- [7] Design for Reliability and Quality, Lecture 4 Approach to Robust Design, Indian Institute of Technology Bombay
- [8] Цветковић Д., Дизајн и развој производа, Универзитет Сингидунум, Београд, 2011.
- [9] Madhav S. Phadke, Introduction To Robust Design (Taguchi Method), <http://www.isixsigma.com/>, преузето 05.04.2014.
- [10] Мајсторовић В., Станић Ј., Спасић З., Стојковић С., Тумбас З., Ракић М., Новије технике инжењерства и квалитета, Институт за индустријске системе, ФТН, Нови Сад, 1994.
- [11] <http://www.york.ac.uk/depts/maths/tables/orthogonal.htm>, преузето 12.04.2014.
- [12] Lawrence P.S., The power of Taguchi Methods, Quality progress, January 1987.
- [13] Јовановић М., Лазић В., Адамовић Д., Ратковић Н., Машински материјали, Машински факултет, Крагујевац, 2003.
- [14] Мр Владан Јововић, Термодинамичке и транспортне карактеристике полимера, Докторска дисертација, Нови Сад, 1996.
- [15] [http://www.gradst.hr/Portals/9/docs/katedre/Gradjevinski%20materijali/web/POLIMERNI %20%20MATERIJALI.pdf](http://www.gradst.hr/Portals/9/docs/katedre/Gradjevinski%20materijali/web/POLIMERNI%20%20MATERIJALI.pdf), преузето 20.04.2014.
- [16] <http://www.prozorivrata.com/materijali/polimeri>, преузето 22.04.2014.
- [17] Недић Б., Ђукић В., Пластичне масе, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [18] <http://www.plastikainfo.com/tehnologija/materijali-polietilen-polyethylene-pe>, преузето 01.05.2014.

[19] Миковић Ј., Испитивање механичких својстава пластичних маса применом Тагучијевих метода, Мастер рад, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

[20] Величковић С., Испитивање утицаја фактора спољашње средине на механичка својства материјала од пластичних маса, Мастер рад, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

[21] <https://polymers.lyondellbasell.com>, преузето 05.05.2014.

[22] <http://211.67.52.20:8088/xitong/BZ%5C7308045.pdf>, преузето 10.05.2014.