

doi: 10.67563/ASESCONF2026048A

Nebojša Antonijević¹

TPP “KOSTOLAC B”, UNIT B3, MPB – BOILER HOUSE, STRUCTURAL AND FOUNDATION DESIGN, SEISMIC DESIGN

Summary: The Boiler House facility, in architectural and structural terms, represents part of the Main Power Building (MPB), together with the turbine hall, bunker tract, and fan building, within the functional unit of Block 5 of Unit B3 at the Kostolac TPP. The object is a steel structure with overall plan dimensions of 70 x 77 m and a height of 57 m in the part of the building outside the boiler. In the middle of the building there is the boiler grillage, a structure that carries the boiler itself, with overall plan dimensions of 24 x 24 m and a total height of 122 m. The building is founded on pile-supported foundation slabs. Beneath the boiler there is a foundation slab measuring 54 x 58.60 m in plan and 3.00 m in thickness, resting on 686 + 12 piles with a diameter of Ø600 mm and a length of 16.60 m. The bottom level of this slab is -6.00 m. Along the perimeter of this foundation slab there are foundation slabs supporting the facade columns of the boiler house. These foundation slabs are 1.50 m or 2.00 m thick. The total number of piles in the boiler house section is 1012.

Keywords: foundation slab, piles, boiler grillage

TE “KOSTOLAC B”, BLOK B3, GPO – KOTLARNICA, PRORAČUN KONSTRUKCIJE I TEMELJA, SEIZMIČKI PRORAČUN

Rezime: Objekat Kotlarnice u arhitektonskom i konstruktivnom smislu predstavlja deo Glavnog Pogonskog Objekta (GPO) zajedno sa turbinskom halom, bunkerskim traktom i zgradom ventilatora u sklopu funkcionalne celine 5 bloka B3 TE Kostolac. Objekat je čelična konstrukcija sistemnih dimenzija u osnovi 70x77 m i visine 57 m na delu objekta van kotla. U sredini objekta se nalazi gerist kotla, konstrukcija koja služi za nošenje samog kotla, koja je sistemnih dimenzija u osnovi 24x24 m i ukupne visine 122 m. Objekat se fundira na temeljnim pločama na šipovima. Ispod kotla je temeljna ploča dimenzija 54x58.60 m u osnovi i debljine 3.00 m koja leži na 686+12 šipova prečnika Ø600 mm i dužine 16.60 m. Kota dna ove ploče je -6.00 m. Po obimu ove temeljne ploče nalaze se dodatne temeljne ploče za oslanjanje fasadnih stubova objekta kotlarnice. Debljine ovih temeljnih ploča su 1.50 tj. 2.00 m. Ukupan broj šipova na delu objekta kotlarnice je 1012.

Ključne reči: temeljna ploča, šipovi, gerist kotla

¹ Termoenergo Inženjering d.o.o., n.antonijevic@termoenergo.com

1. UVOD

Predmet rada predstavlja centralna jedinica sistema novoizgrađenog bloka B3 u sklopu TE "Kostolac B". U pitanju je Glavni Pogonski Objekat (GPO) u sklopu TE Kostolac B, tačnije objekat Kotlarnice, koja je u sklopu GPO-a pored mašinske tj. turbinske hale, bunkerskog trakta i zgrade ventilatora iza kotlarnice.

JP EPS u svom sastavu ima 22 termobloka, 49 hidroagregata, 1 reverzibilnu hidroelektranu sa 2 agregata, 1 pumpno postrojenje sa 2 pumpe, vetroelektranu i solarne elektrane. Ukupna instalisana snaga svih proizvodnih kapaciteta EPS-a iznosi cca 8290 MW od čega TE (termoelektrane) i TE-TO (termoelektrane-toplane) obezbeđuju 62.6 % ukupnog kapaciteta i skoro 70% godišnje potrebe za strujom. TE Kostolac A i B učestvuju sa instalisanom snagom od 1357 MW, od čega predmetni novoizgrađeni blok B3 u sklopu koga je i GPO učestvuje sa 350 MW.

Kako je strategija razvoja Republike Srbije u narednom periodu po pitanju energije fokusirana na obnovljive izvore energije i smanjenje emisije štenih gasova objekat Kotlarnice u sklopu TE Kostolac B3 predstavlja poslednji objekat ovog tipa koji je izgrađen na ovim prostorima.

Na osnovu Međudržavnog sporazuma o ekonomskoj i tehničkoj saradnji u oblasti infrastrukture, sklopljenog između NR Kine i Republike Srbije, 2010. godine je zaključen Opšti ugovorni sporazum i dva posebna ugovorna sporazuma sa kineskom kompanijom CMEC (China Machinery Engineering Corporation) o realizaciji paketa projekata u Termoelektrani i Kopovima Kostolac.

U prvoj fazi planirana je rekonstrukcija bloka B1 sa rekonstrukcijom elektrofiltera, izgradnja sistema odsumporovanja u TE „Kostolac B“, izgradnja luke i izgradnja železničke pruge. Rekonstrukcija bloka B1 je završena, kao i sistem odsumporavanja dimnih gasova.

JP EPS sa ogrankom "TE-KO Kostolac" je realizovao drugu fazu Paket projekata TE "Kostolac B" koja obuhvata izgradnju novog bloka snage 350 MW (Blok B3) na lokaciji TE "Kostolac B". Projekat je realizovane uz finansijsku podršku i saradnju sa partnerima iz NR Kine.

Termoelektrana "Kostolac B", sa pratećim objektima i tehnološkim sistemima, nalazi se na udaljenosti od oko 15 km od grada Požarevca, severoistočno od kopa uglja, na desnoj obali reke Mlave, u prostoru između: arheološkog nalazišta Viminacijum na severnoj i severoistočnoj strani, otvorenog kopa lignita "Drmno" na istoku, gradilišta naselja Drmno, opštinskog puta Kostolac-Drmno-Bradac i granici proširenog lokalnog groblja Starog Kostolca na jugu i na zapadu desne obale reke Mlave. Kompleks se prostire na površini od oko 102 ha.

U okviru Termoelektrane "Kostolac B" postoje i rade dva bloka B1 i B2, snage 2x348.5 MW.

Obe jedinice puštene su u rad 1988 blok B1 i 1992 blok B2.

Blok B3 će se koristiti za potrebe elektroenergetskog sistema Srbije (EPS), sa očekivanim minimalnim vremenom rada 7500 sati godišnje. Kao rashladna voda za potrebe hlađenja kondenzatora koristiće se voda iz Dunava

Projekat bloka B3 je podeljen na funkcionalne celine od kojih svaka obuhvata grupu tehnološko mašinskih, elektroenergetskih i upravljačkih sistema, građevinskih konstrukcija i zgrada i svu neophodnu infrastrukturu. Ove celine odražavaju faznu realizaciju Projekta koja se ogleda u faznoj izradi projektne dokumentacije i izgradnji samog Objekta.

1.1. PROJEKTOVANJE – IZRADA PROJEKTNE DOKUMENTACIJE

Faza izrade projektne dokumentacije je po mnogo čemu bila specifična. Ukupno vreme projektovanja celokupnog Sistema je bilo preko 15 godina. Počevši sa izradom pred-projektne dokumentacije pod nazivom "Prethodni radovi za izgradnju novog termoeenergetskog postrojenja korišćenjem uglja sa PK "Drmno", Kostolački ugljonosni basen" [1] u periodu 2009-2010. godine (Energoprojekt ENTEL, Rudarski institut) pa sve do Projekta za izvođenje odnosno Projekta Izvedenog Objekta čije su poslednje prihvaćene sveske urađene 2025. godine.

Kako zbog kompleksnosti samog postrojenja, koje je bilo podeljeno na 14 funkcionalnih celina, kako bi se ubrzalo izdavanje građevinskih dozvola za celinu po celinu, tako i zbog kompleksnosti samih objekata, a i posvećenosti svih uključenih strana u sam proces izrade projektne dokumentacije TEKO B3 celokupan proces izrade projektne dokumentacije je dostigao pomenuto potrebno vreme.

1.1.1. Glavni Pogonski Objekat (GPO)

Celokupan projekat, kao što je napomenuto, je bio podeljen u više funkcionalnih celina kako bi se izdavanje građevinskih dozvola izvodilo nezavisno za svaku celinu i kako bi se celokupan proces dobijanja građevinskih dozvola ubrzao. Funkcionalne celine projekta bloka B3 su bile podeljene prema sledećem [2][3]:

- Funkcionalna celina 1, Hemijska priprema vode
- Funkcionalna celina 2, Snabdevanje vodom
- Funkcionalna celina 3, Spoljašnji sistem mazuta
- Funkcionalna celina 4, Dimnjak
- Funkcionalna celina 5, Glavni tehnološki sistem
- Funkcionalna celina 6, Odsumporavanje dimnog gasa
- Funkcionalna celina 7, Sistem krečnjaka
- Funkcionalna celina 8, Vlažni elektrofilter (WESP)
- Funkcionalna celina 9, Doprema uglja
- Funkcionalna celina 10, Unutrašnji transport pepela i šljake
- Funkcionalna celina 11, Spoljašnji transport pepela i šljake
- Funkcionalna celina 12, VN veze iz TEKO B3 prema RP 400 kV i 110 kV
- Funkcionalna celina 13, Priključak TEKO B3 u RP 400 kV i 110 kV
- Funkcionalna celina 14, Saobraćajnice, spoljašnje instalacije i cevovodi

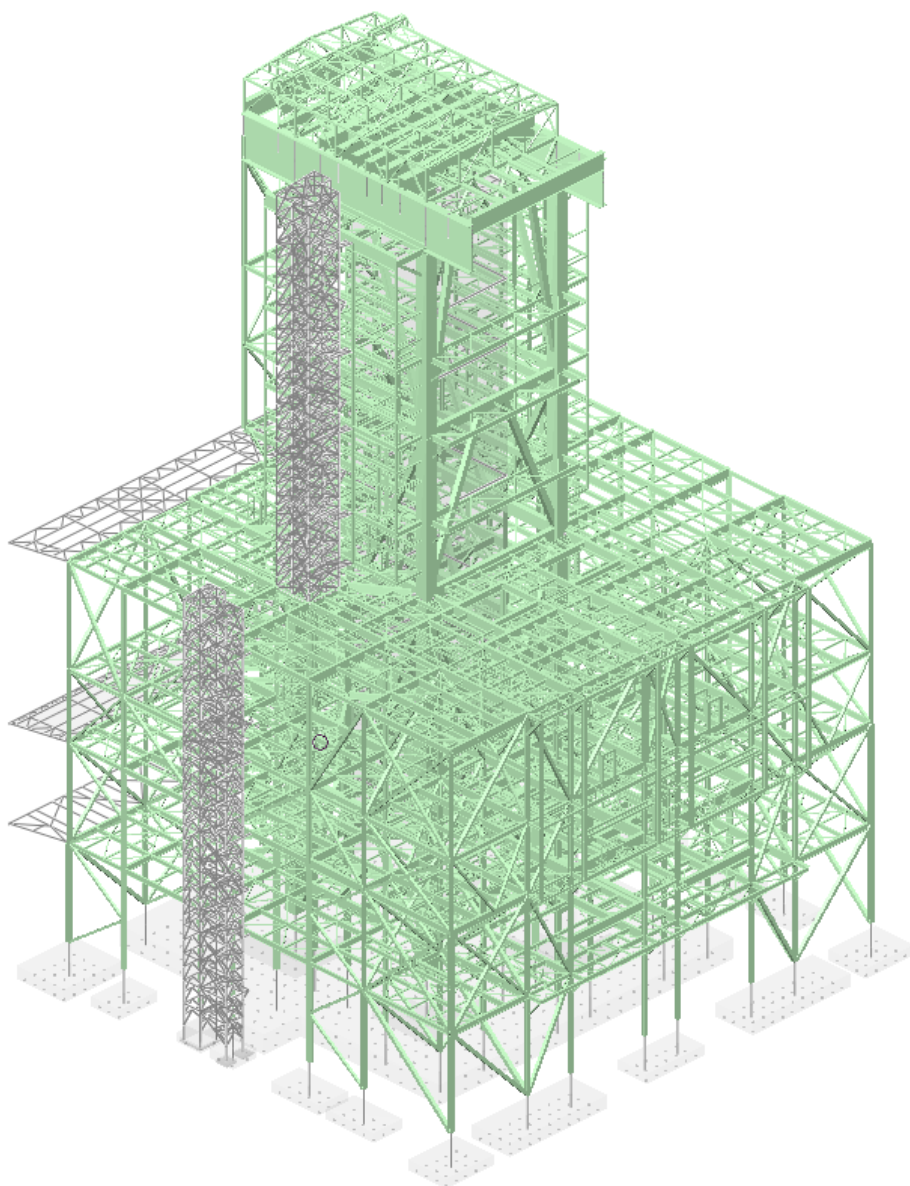
Glavni pogonski objekat je deo funkcionalne 5 u datoj opštoj podeli novog bloka B3 u sklopu TE „Kostolac B”.

Objekat kotlarnice se nalazi u sklopu GPO-a koji zauzima centralno mesto u sklopu Funkcionalne celine 5 pored ostalih objekata u sklopu FC5 (elektroupravljačka zgrada, pešački most između B2 i B3, zgrada dizel generatora, radionica za održavanje mlinova, kompresorska stanica, upravljačka zgrada suvog elektro filtera, objekat ventilatora dimnih gasova i objekat suvog elektrofiltera).

Pored objekta Kotlarnice u sklopu GPO-a se nalaze još i objekat ventilatora svežeg vazduha, turbinska sala, deaerator/bunkerski trakt kao i platforme između ovih objekata.

1.1.2. Kotlarnica

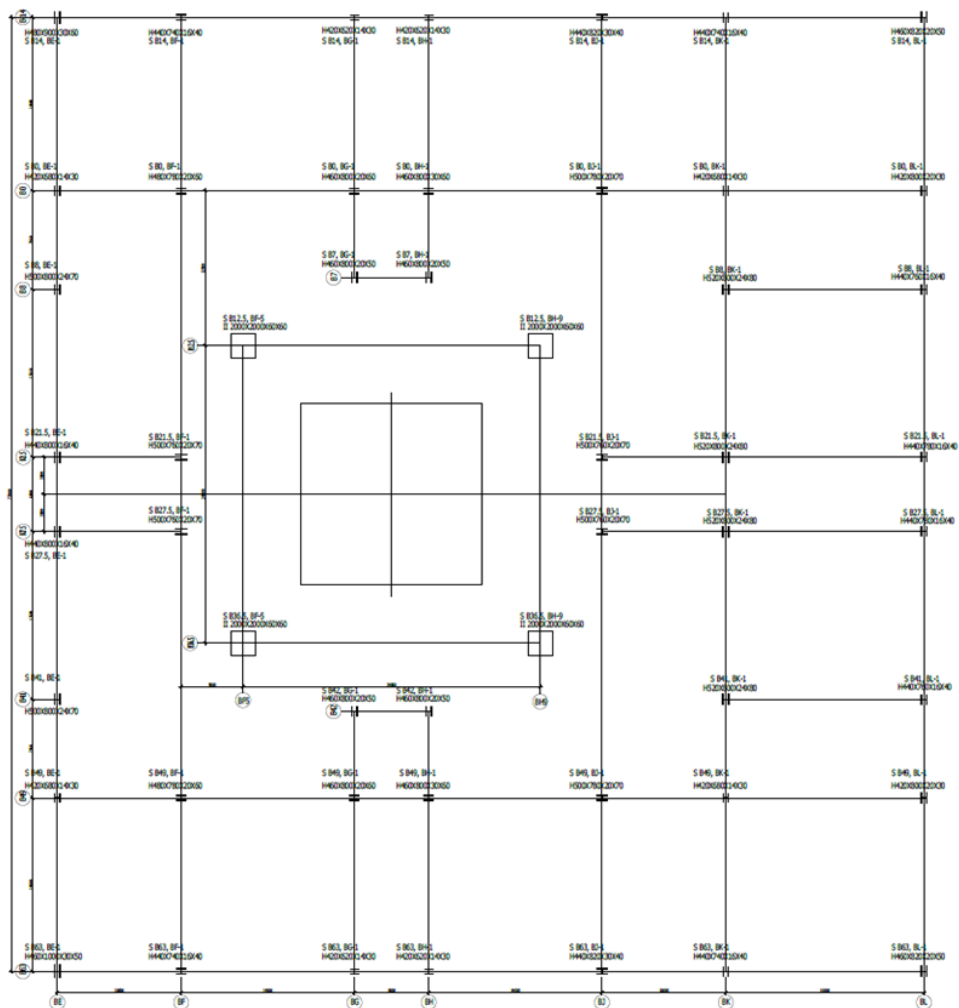
Objekat kotlarnice zauzima centralni i dominantan položaj u okviru nove, treće celine bloka „B3“ TE „Kostolac B“, a povezan je sa deaeratorom/bunkerskim traktom i zgradom ventilatora svežeg vazduha. Kompletan kotlarnica povezuje sve celine koje se nalaze unutar nove jedinice (blok B3) na lokaciji TE „Kostolac B“ i predstavlja poseban prostorni i konstruktivni segment. Zgrada kotla sastoji se od donjeg dela kotlarnice i višeg dela nosača kotla u kome je kotao opremljen svom pratećom opremom. Čelična konstrukcija je izvedena od zavarenih nosača I poprečnog preseka i standardnih toplo valjanih I, U i L profila. Proračunski model objekta Kotlarnice prikazan je na slici 1. Za proračun i projektovanje objekta i temelja korišćen je softverski paket “Tower 8”.



Slika 1: Proračunski model objekta Kotlarnice

Konstrukcija kotlarnice ima pravougaoni oblik u osnovi sa sistemskim dimenzijama $B \times L = 70.00 \times 77.00$ m (osa BE / BL x B63 / B-14 i sa konzolnim delom od 2.50 m u osi BL ka susednoj konstrukciji objekta ventilatora svežeg vazduha. Donji deo kotlarnice je 57 m visoka konstrukcija koja okružuje središnji deo 122 m visoke kotlovske konstrukcije sa krovom. Središnji deo, nosač kotla, izveden je kao ramovska konstrukcija. Konstrukcija kotla je ovesena na dva glavna nosača, koja su oslonjena na okvir koji se sastoji od 4 glavna stuba, dimenzija 2000 mm x 2000 mm. Sistemne dimenzije srednjeg dela, gerista kotla, su 24 m x 24 m. Gornja kota čeličnih stubova je +108.70.

Ovi stubovi su uklješteni u temeljnu konstrukciju. Veza između stubova i horizontalnih greda projektovana je kao kruta.). Osnova stubova objekta Kotlarnice predstavljena je na slici 2.



Slika 2: Osnova stubova objekta kotlarnice

Noseći stubovi kotla povezani su horizontalnim gredama putem krute veze - uklještenja, a prostornu stabilnost pružaju i vertikalni spregovi u obliku slova „V“.

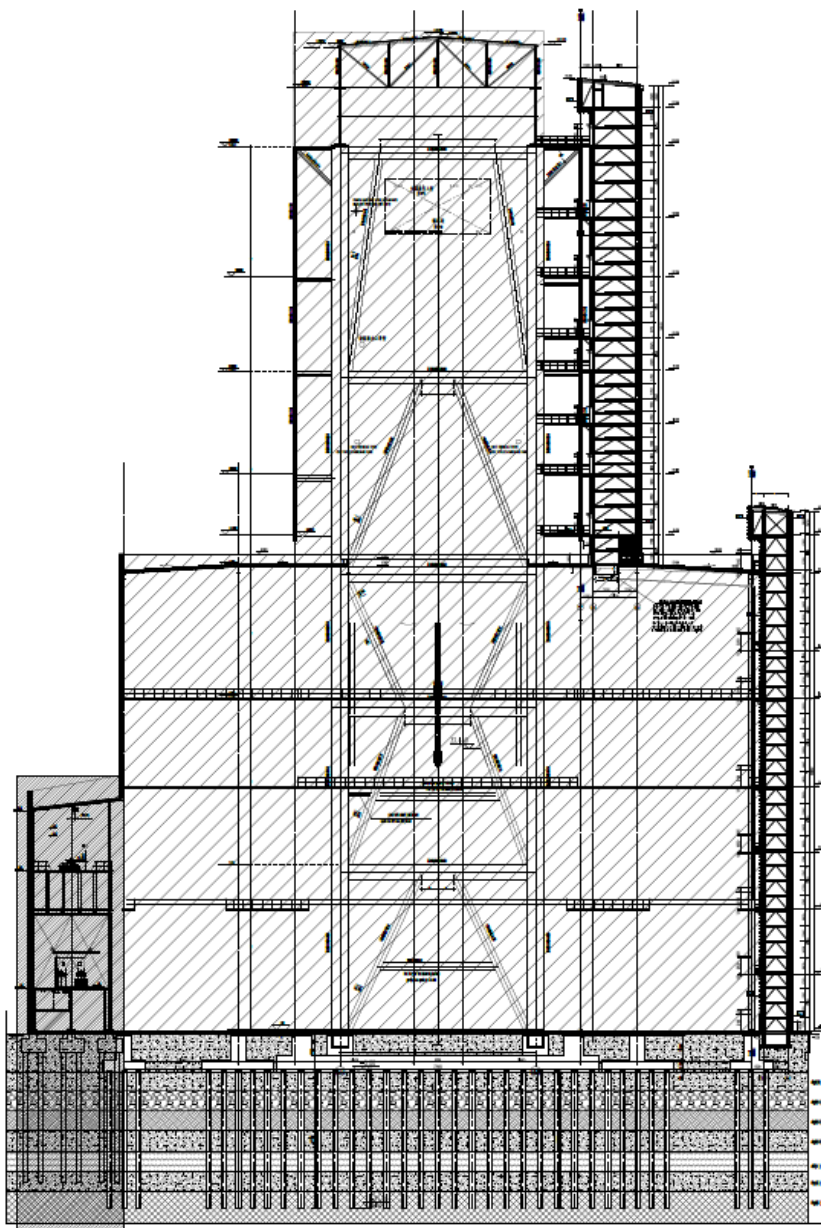
Povezivanje ovog srednjeg dela sa preostalim delom kotlarnice visine 57.0 m izvedeno je putem kliznih oslonaca na tačkama u preseku osa nosača gerista kotla BF5/B36.5, BF5/B12.5, BH9/B36.5 i BH9/B12.5. Klizni oslonci su projektovani i izvedeni u vidu teflonskih oslonaca da obezbede prenos samo vertikalnih reakcija. Teflon je materijal sa vrlo malim koeficijentom trenja (0.06 ~ 0.1) te je kao takav bio najpogodniji da omogući projektovano nezavisno seizmičko ponašanje 2 celine objekta sa različitim krutostima.

Ukupna masa samog kotla iznosi 6613 t dok je masa radnog fluida 1138 t. Vertikalno opterećenje kotla se putem 256 vešaljki i preko sekundarnih nosača prenosi na 2 glavna nosača I poprečnog preseka visine 7000 mm sa nožicama $\nless1400\times100$ mm i rebrom debljine 60 mm. Ovi nosači su oslonjeni u 2 tačke na gerist kotla, a bočno pridržavaju rešetkastom konstrukcijom upravnom na pomenute nosače u ravnima gerista kotla. Bočno pridržavanje kotla, za prijem horizontalnih sila, se ostvaruje na nivoima: 20.29, 37.902, 48.80, 65.25, 84.95 i 94.75 putem posebnih vođica.

Cela konstrukcija gerista kotla služi za oslanjanje glavnih nosača kotla, cevovoda, platformi, krova i svih ostalih elemenata koji pripadaju kotlu.

Na kotama +92.70; +81.15; +68.40 postoje glavne konzolne platforme olonjene na glavne stubove. Ove platforme su povezane sa spoljnim stepeništem. Pored ovih glavnih platformi postoji još nekoliko manjih, sekundarnih, na kotama +108.85, +99.90, +95.90, +92.70, +89.00, +85.20, +77.60, +74.60, +65.80, +63.40 i +61.00 m.

Poprečni presek objekta prikazan je na slici 3



Slika 3: Poprečni presek objekta Kotlarnice

Konstrukcija je modelovana kao integralna celina temeljne konstrukcije i nadzemne čelične konstrukcije. Šipovi su modelovani kao tačkasti oslonci uz uvažavanje parametara tla dobijenih geomehaničkim elaboratom uzimajući u obzir redukciju krutosti za grupu šipova. Odnos krutosti naglavica-šip-tlo je uzet u obzir preko koeficijenta horizontalne i vertikalne krutosti oslonaca tj. šipova, uzimajući u obzir uticaj grupe šipova, koji simulira međusobni odnos temeljne konstrukcije u proračunskom modelu. Metodologija proračuna krutosti šipova je uniformna i za vrednost vertikalne krutosti prati sledeće korake: sila u šipu → sleganje → grupa šipova → krutost grupe šipova. Vrednosti horizontalne i krutosti šipa na savijanje su sračunate prema realnim fizičko mehaničkim karakteristikama tla i materijala šipa i uvažavanjem efekta šipova u grupi.

Pri definisanju vertikalne krutosti šipova temelja kotla uzet je u obzir redosled gradnje i nanošenja nekoliko velikih stalnih opterećenja koja opredeljuju ukupnu proračunsku vrednost sleganja ovog temelja. Ovim je postignuto da se u modelu iskaže samo diferencijalno sleganje temelja kotla u odnosu na susedne temelje kotlarnice, koje nastaje nakon montaže delova čelične konstrukcije i direktno utiče na naprezanje čeličnih konstrukcija. Ovo je ostvareno modifikacijom računске krutosti koja je izvedena iz podataka opterećenje – sleganje temelja kotla prikazanih u „Geotehnički elaborat, Glavni pogonski objekat – PGD050“, 107-4-050/17, decembar 2018, Saobraćajni institut CIP d.o.o. Učinjena modifikacija bazira se na postupku (redosledu) gradnje, odnosno nanošenja nekoliko veoma velikih stalnih tereta (sopstvena težina ploče temelja, nasipa sa završnom podnom pločom, gerista kotla i samog kotla) koji je predviđen tehnologijom montaže opreme kotlarnice. Na ovaj način postignuto je da čelične konstrukcije kotlarnice budu izložene samo diferencijalnim sleganjima koja nastaju nakon kompletiranja konstrukcije. S obzirom da su pri proračunu sleganja temelja na šipovima urađenim u dokumentaciji „Geotehnički elaborat, Glavni pogonski objekat – PGD050“, 107-4-050/17, decembar 2018, Saobraćajni institut CIP d.o.o., na osnovu mišljenja eksperta – konsultanta Investitora, primenjeni postupci na strani sigurnosti, kao i da nije uzeta u obzir interakcija temelja kotla i drugih temelja čelične konstrukcije, može se oceniti da je čelična konstrukcija proračunata na veća diferencijalna sleganja od onih koja se mogu očekivati, što je na strani sigurnosti^{[2] [3]}.

Pored nadzemnog čeličnog dela konstrukcije u proračunskom modelu je, kao integralna celina, modelovana i temeljna konstrukcija objekta u vidu temeljne ploče debljine 3,00 m dimenzija u osnovi 54,00 x 58,60 m, ispod centralnog dela objekta i kotla na dubini od 6,00 m čija je ukupna zapremina 9657 m³. Obodni fasadni stubovi se oslanjaju na temeljne ploče debljine 1,50 tj. 2,00 m na dubini od 5,00 m u odnosu na kotu poda objekta. Zaštitni sloj betona temeljne ploče je 50 mm i projektovan je od betona MB40. Na delu temeljne ploče između osa BG/BH i B49/B63 se nalazi pravougaoni ispušni dimenzija u osnovi 6,80 x 8,00 m, iste debljine od 3,00 m, koji služi u fazi montaže čelične nadzemne konstrukcije kao prostor za oslanjanje kрана. Temeljna ploča kotla leži na bateriji od 686+12 šipova dok pomenuti fasadni stubovi i njihove temeljne ploče leže na baterijama od 5, 11, 12, 15, 18, 20, 30 i 40 šipova. Ukupan broj šipova ispod objekta je 1012. Šipovi su izvedeni od betona MB40 klase vodonepropusnosti V-6 sa zaštitnim slojem od 75 mm. kao CFA šipovi Šipovi su računati kao uklješteni u temeljnu ploču sa karakterističnom vertikalnom nosivošću od 1672 kN.

U okviru kotlarnice nalaze se dve čelične konstrukcije za nošenje lifta: -lift duž linije B63, između redova BG i BH, od kote 0.00 do kote +57 i lift od kote +57 na krovu kotlarnice do kote krova gerista kotla. Oba su modelirana zajedno sa nosećom čeličnom konstrukcijom kotlarnice kako bi se osigurao prenos relevantnih uticaja u glavnu noseću konstrukciju objekta kotlarnice.

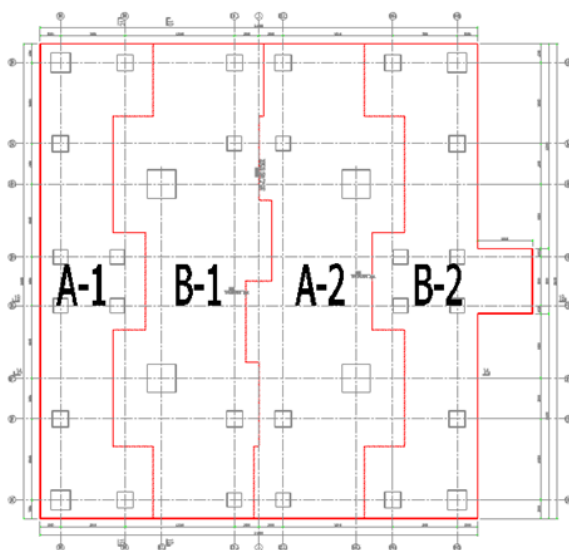
Ukupan broj različitih profila upotrebljenih u proračunskom modelu iznosi 717 dok je ukupan broj štapnih elemenata u proračunskom modelu iznosi 9830 sa ukupnom projektovanom masom nadzemnog čeličnog dela konstrukcije od 10500 t.

Obzirom na značaj objekta za Republiku tehnička kontrola je zahtevala da se sprovede i seizmički proračun metodom direktne dinamičke analize obzirom da je važeća zakonska regulativa u Republici Srbiji u vreme projektovanja bila u tranzitnom periodu sa starih SRPS propisa na nove EC norme. Sva stalna, korisna, temperaturna kao i opterećenja snegom i vetrom

su sračunata prema SRPS U. propisima dok su opterećenja od opreme aplicirana prema podlogama datim mašinskim delom projekta. Seizmička opterećenja su sračunata u skladu sa SRPS EN 1998 propisima. Odlukom republičke revizije komisije je dogovoreno da se dimenzionisanje sprovodi prema, u tom trenutku važećim SRPS propisima, a da se seizmičke sile određuju prema EC normama. Pri izradi projekata za građevinsku dozvolu prihvaćeno je da se direktna dinamička analiza (DDA) izradi u fazi pripreme projekata za izvođenje (PZI), i to na finalnim proračunskim modelima iz PGD koji su urađeni, shodno ugovornoj obavezi i unapred postignutim dogovorom sa naručiocem i tehničkom kontrolom, prema srpskim standardima uz proračun seizmičkih uticaja primenom multimodalne analize (MMA) prema evropskim standardima – Evrokodu 8. Nakon sprovedenih analiza

“Na osnovu sprovedenih proračuna i analize rezultata može se konstatovati da je uticaj seizmike na veličinu presečnih sila za dokaze nosivosti i stabilnosti razmatranih konstrukcija prema DDA manji nego kada se seizmički uticaji proračunavaju prema MMA. Stoga je proračun konstrukcija sproveden u okviru PGD-u sa seizmičkim uticajima prema MMA na strani sigurnosti u odnosu na proračun prema DDA. Ovakav zaključak se može izvesti generalno za sve elemente konstrukcije, uključujući i šipove i pomeranja odnosno deformacije, i po oba kriterijuma definisana u kompatibilnom standardu - Evrokodu 8 - i po kriterijumu maksimalnih vrednosti iz 3 zapisa zemljotresa i po kriterijumu srednjih vrednosti iz 7 zapisa zemljotresa.”^[4]

Konstrukcija temelja kotla je masivna. Nakon betoniranja sve mere za negu betona su morale biti pravilno sprovedene kako bi se sprečilo pojavljivanje prslina. Usvojeno je da se za betonsku smesu koristi Portland cement niske temperature vezivanja. Najveća pažnja je bila potrebna na očuvanju vlažnosti betonske smese u uslovima povećane spoljne temperature te se beton polivao vodom i pokrивao plastičnim folijama, kako površine betona ne bi dehidrirale, a pritom se neprestano kontrolisalo da temperaturna razlika između unutrašnje i spoljašnje ivice betona nije viša od 25°C. Za efikasan monitoring prilikom betoniranja temelja kotla neophodno je bilo kontinualno praćenje unutrašnje i spoljašnje temperature ugrađenog betona te su u tu svrhu bili ugrađeni senzori temperature u betonskoj masi. Kako bi se osigurao kvalitet izvođenja radova i betonske konstrukcije bez štetnih pukotina kvalitet izvođenja radova se mora kontrolisati. Temelj se izvodio sa radnim spojnica, a prema sledećoj šemi predstavljenoj na slici 4 koja prikazuje faze betoniranja temelja kotla tj. Kotlarnice.



Slika 4: Faze betoniranja temelja Kotlarnice

Konačan izgled karakterističnih oslonačkih stubova temelja Kotlarnice i uporedni prikaz veličine prema figuri čoveka nakon završetka izvođenja temelja prikazan je na slici 5.



Slika 5: Temelj Kotlarnice nakon završetka izvođenja temelja

Obzirom na sve navedene činjenice i specifičnosti vezane za sam proces projektovanja i izvođenja, objekat Kotlarnice predstavlja, svakako, jedan od primera uspešno sprovedenih procesa međusobne koordinacije svih učesnika na jednom ovako kompleksnom i zahtevnom objektu. Objekat je decembra 2024. godine zvanično predat Investitoru na korišćenje i do danas pouzdano radi uz zadovoljavanje najviših ekoloških standarda za ovaj vid proizvodnje energije obezbeđujući tržištu Srbije 5% ukupne električne energije.

Na slici 6 prikazan je objekat u fazi izgradnje.



Slika 6: Objekat Kotlarnice u fazi izvođenja

REFERENCE

- [1] Energoprojekt Entel a.d. Studija opravdanosti sa Idejnim projektom izgradnje bloka B3 snage 350 MW na lokaciji TE Kostolac B, Idejni Arhitektonsko-Građevinski projekta, Novembar 2013.
- [2] Termoenergo Inženjering d.o.o. Projekat za Građevinsku dozvolu,
- [3] Termoenergo Inženjering d.o.o. Projekat za izvođenje,
- [4] Termoenergo Inženjering d.o.o., “Tehnički opis uz direktnu dinamičku analizu konstrukcija glavnih pogonskih objekata TE “Kostolac B3”; Boris Gligić dipl. građ. inž., Doc. dr. Nenad Pecić dipl. građ. inž., jun 2019.