

INSTYTUT FIZYKI JADROWEJ
im. Henryka Niewodniczanskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2009/
Kraków, czerwiec 2009

Raport 2029/AP

**Analiza deformacji 6 metrowego teleskopu CTA przy
użyciu MES**

Michał Sienkiewicz

Streszczenie

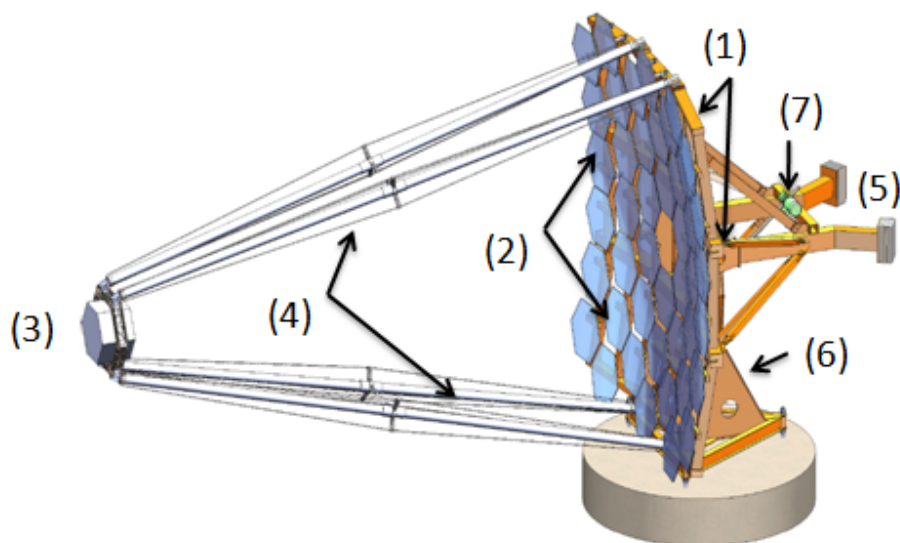
Obecnie trwają prace nad projektem nowego obserwatorium promieniowania gamma - Cherenkov Telescope Array (CTA). W raporcie przedstawiono część prac zrealizowanych w IFJ PAN dla CTA. Polegały one na przeprowadzeniu przy użyciu MES (Ansys) analizy wytrzymałościowo-odkształceniowej jednego z projektowanych teleskopów - teleskop o „średnicy” czaszy 6 m zaproponowany przez MPI-K Heidelberg. Obliczenia objęły analizę deformacji czaszy pod wpływem obciążenia własnego, wiatrowego i temperaturowego.

Abstract

At present, design of new ground-based gamma-ray observatory (the Cherenkov Telescope Array - CTA) is in progress. The report presents part of the work carried out in the IFJ PAN for the CTA. It was strength-deformation analysis of one of the designing telescopes (6 m telescope proposed by Ruben Kankanyan from MPI-K Heidelberg). The calculations was carried out by using Finite Element Method (Ansys) and included the analysis of deformation of dish under dead, temperature and wind load.

1 Wprowadzenie

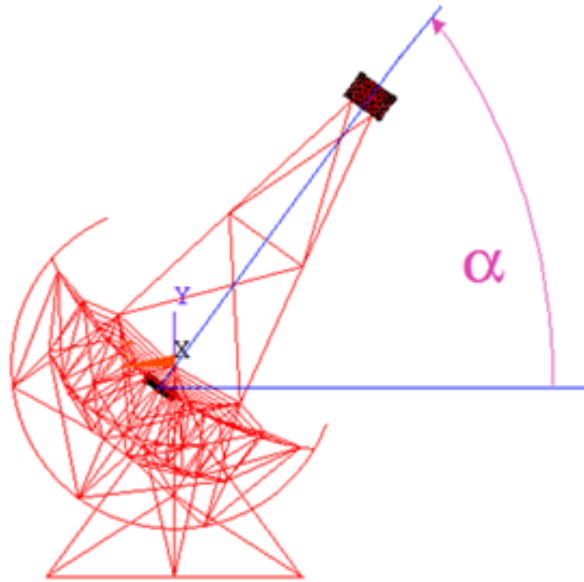
Przeprowadzona została przy użyciu Metody Elementów Skończonych analiza wytrzymałościowo-odkształceniowa najmniejszego z planowanych teleskopów CTA¹. Jest to teleskop o „średnicy” czaszy 6 m. Jego projekt został zaproponowany przez Rubena Kankanyana z MPI-K Heidelberg (rys. 1)[2].



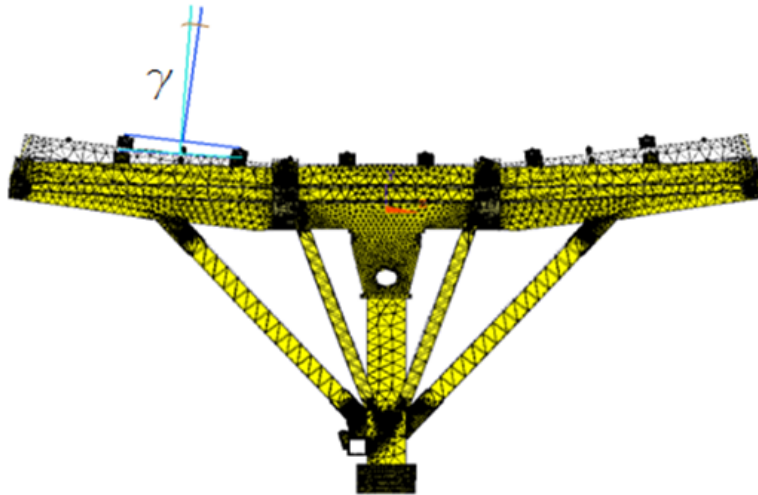
Rysunek 1: Proponowany przez MPI-K teleskop CTA o „średnicy” 6m

Teleskop składa się z następujących elementów: czaszy (1), luster (2), kamery (3), masztu kamery (4), przeciw wagi (5), podstawy (6), urządzenia poruszającego (7). Obiekt ten może obracać się wokół dwóch osi: pionowej i prostopadłej do niej. Pozwala to na skierowanie czaszy teleskopu na dowolny punkt nocnego nieba. Istotne znaczenie (ze względu na odkształcenia czaszy) ma obrót wokół osi poziomej (rys. 2). Zmieniający się podczas ruchu wokół tej osi rozkład sił powoduje zmianę deformacji czaszy (rys. 3), co przekłada się na pojawienie się niepożądanych efektów optycznych (np.: rozmazanie obrazu obserwowanego obiektu).

¹Cherenkov Telescope Array - planowane obserwatorium promieniowania gamma pochodzącego z kosmosu, na które ma się składać szereg pojedynczych teleskopów o średnicach 6 m, 12 m i 24 m.[1][3]



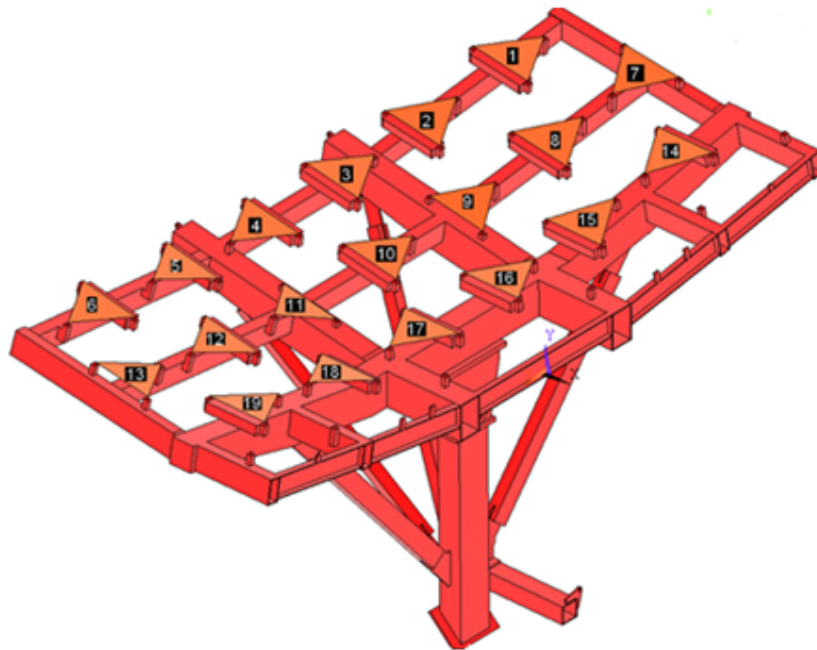
Rysunek 2: Kąt obrotu α czaszy wraz z kamerą wokół osi poziomej



Rysunek 3: Typowa deformacja czaszy dla $\alpha = 90$ deg.

2 Obliczenia

Główne wymaganie dla tej konstrukcji wynikało z ograniczeń optycznych i zostało sprowadzone do następującego żądania: kąt dewiacji każdego lustra musi być mniejszy niż $150 \mu\text{rad}$ [3]. Na rys. 4 przedstawiono numerację luster ze względu na ich położenie na czaszy. Uwzględniona została symetria tego elementu teleskopu.



Rysunek 4: Numeracja elementów odpowiadających lustram - połowa czaszy

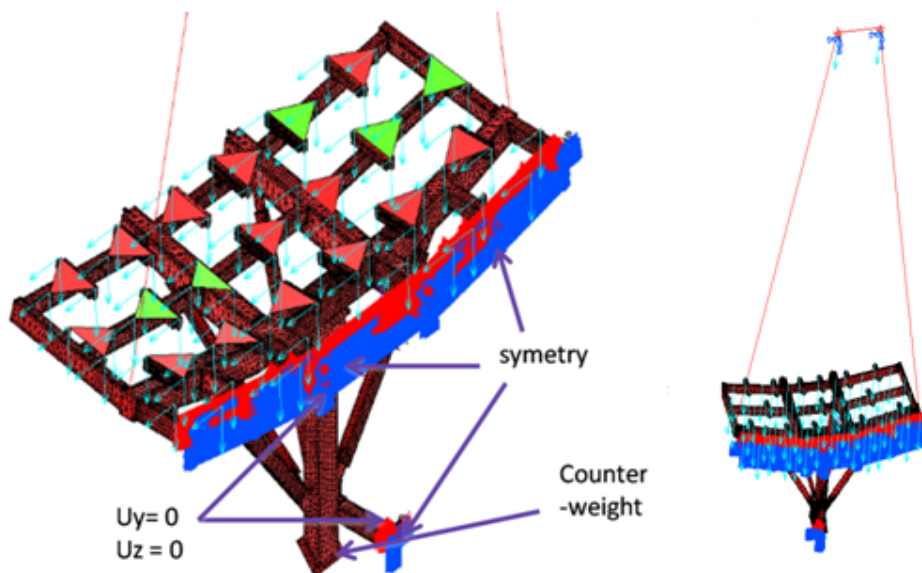
Pod uwagę wzięto następujące rodzaje obciążeń:

- ciężar własny konstrukcji
- cykle temperaturowe
- wiatr

Ponad to przeprowadzono także analizę modalną.

2.1 Ciężar własny

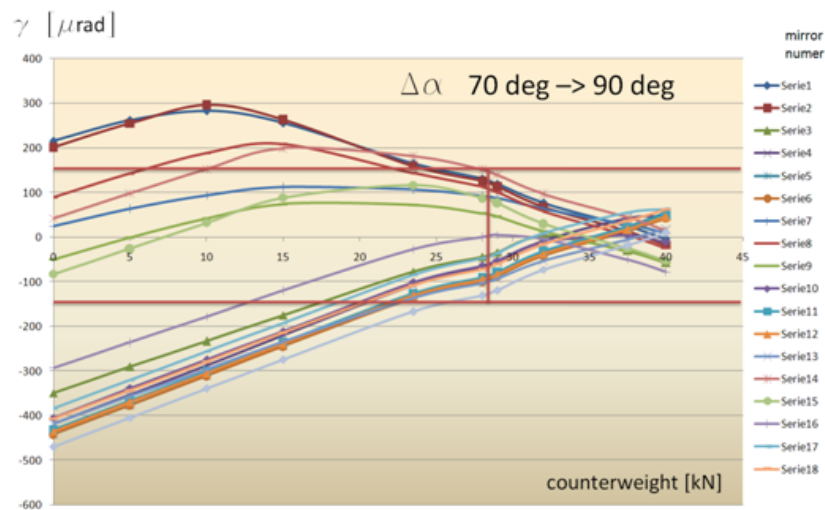
Do obliczeń odkształceń połowy czaszy (symetria) wynikających ze zmiany jej pozycji użyto 160 tys. elementów skończonych (Ansys). Obciążenie wynikające z ciężaru własnego modelowane jest jako iloczyn masy każdego elementu i przyspieszenia ziemskiego. Dodatkowo wprowadzane są siły zastępujące ciężar lusterek, których nie uwzględnia model geometryczny. Każde lustro podparte jest trójpunktowo, a więc uwzględniając jego ciężar (ok. 30 kg) przyjęto, że dodatkowe obciążenie w węzłach odpowiadających podparciu lustra wynosić będzie : 100 N (rys. 5). Podobnie sytuacja przedstawia się jeśli chodzi o ciężar kamery. Przyjęto, że kamera waży ok. 400 kg, a więc zadano w czterech węzłach dodatkowe obciążenie równe 1 kN.



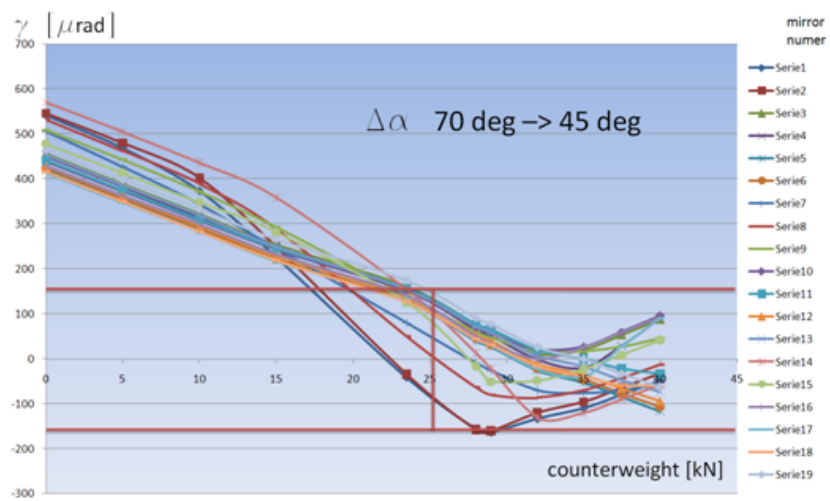
Rysunek 5: Warunki brzegowe i obciążenia zastosowane w obliczeniach

Czasza została utwierdzona w dwóch punktach: w miejscu osadzenia czaszy na sworzniu po którym zachodzi obrót oraz w punkcie połączenia czaszy z siłownikiem wymuszającym jej obrót (rys. 5).

Ważnym elementem wpływającym na deformacje czaszy, a także na wielkość nacisku na siłownik jest przeciwwaga. Znalezieniu optymalnej wartości przeciwwagi poświęcona została więc znaczna część analizy. Zostały przeprowadzone obliczenia dla kilku różnych wartości ciężaru przeciwwagi. Wyniki uzyskane dla tych obliczeń zobrazowane są na rys. 6 i rys. 7.



Rysunek 6: Dewiacje poszczególnych luster w zależności od wartości przeciwwagi po obrocie czaszy z pozycji $\alpha = 70$ deg do $\alpha = 90$ deg



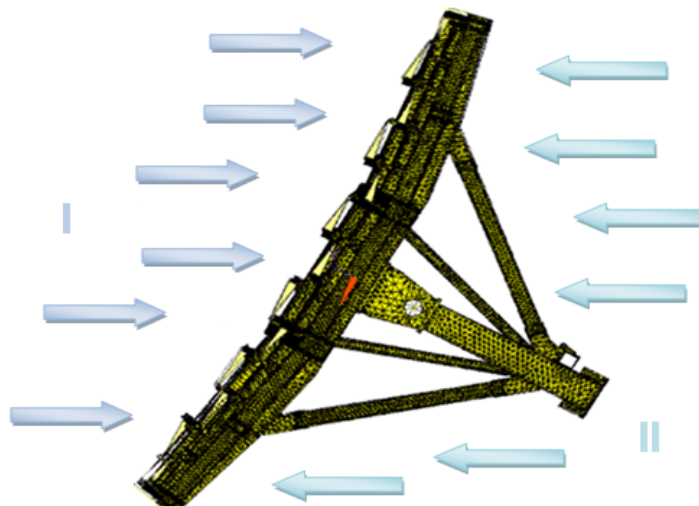
Rysunek 7: Dewiacje poszczególnych luster w zależności od wartości przeciwwagi po obrocie czaszy z pozycji $\alpha = 70$ deg do $\alpha = 45$ deg

Należy nadmienić, że obliczenia wykonane były przy założeniu, że montaż luster, a w szczególności ich justowanie odbędzie się przy położeniu czaszy dla $\alpha = 70$ deg. Przyjęto zatem wartość deformacji dla tego położenia jako punkt odniesienia. Oznacza to, że deformacja podawana na wykresie jest różnicą aktualnej deformacji (np. dla $\alpha = 90$ deg, rys. 6) i deformacji odniesienia ($\alpha = 70$ deg).

Z wykresów niezбитie wynika, że aby spełnić warunek stawiany tej konstrukcji (tj. $\gamma < 150 \mu\text{rad}$ dla każdego lustra), potrzebna jest przeciwwaga o masie odpowiadającej obciążeniu co najmniej 28 kN. Ze względu na to, że moment bezwładności czaszy względem poziomej osi powinien być jak najmniejszy, ciężar przeciwwagi również powinien być jak najmniejszy.

2.2 Wiatr

Obliczenia wiatrowe zostały podzielone na dwie części. Pierwsza dotyczyła sprawdzenia czy dla przyjętej prędkości wiatru (np. 50 km/h) możliwe są pomiary, a więc czy spełnione są wciąż wymagania, że dewiacja każdego lustra jest mniejsza od $150 \mu\text{rad}$. Druga część natomiast miała odpowiedzieć na pytanie odnośnie przetrwania konstrukcji przy wietrze dochodzącym do 200 km/h.



Rysunek 8: Kierunek wiatru w przypadku jego maksymalnego oddziaływania ($\alpha = 45$ deg)

W obu przypadkach do wyznaczenia siły (ciśnienia) z jaką oddziałuje wiatr o określonej prędkości na czaszę posłużono się polskimi normami [4]. Wielkość normowego obciążenia wiatrem określa wzór:

$$w_0 = \frac{1}{16}v^2C \quad \left[\frac{kG}{m^2} \right]$$

gdzie:

v - prędkość wiatru [m/sek]

C - współczynnik opływu

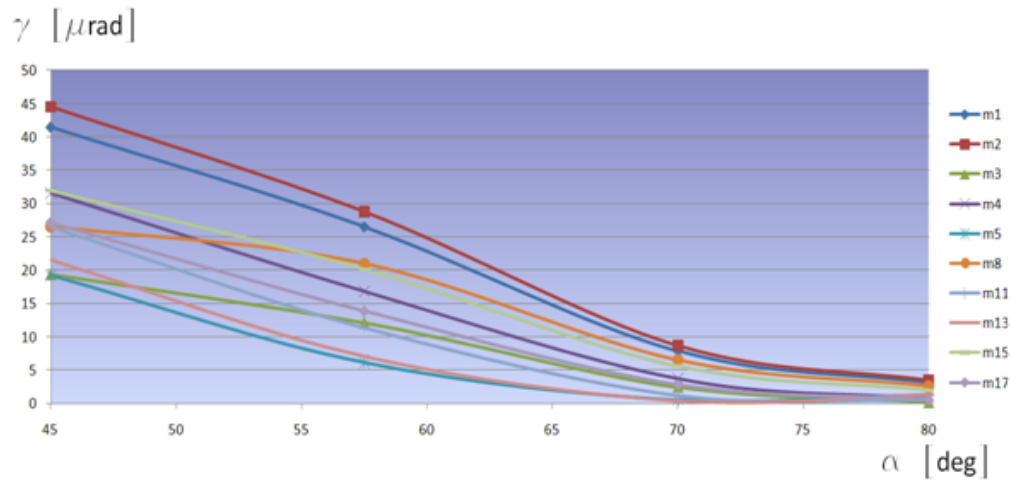
Jak widać z powyższego wzoru wartość obciążenia wiatrowego zależała od prędkości wiatru i od współczynnika opływu, który to zależał od kąta pochylenia teleskopu α . Wartości współczynnika C zestawione zostały w poniższej tabeli:

α [deg]	45	57.5	70	80
C	0.5	0.35	0.12	0.07

Finalna wartość obciążenia zadawanego w węzłach obliczana była przez pomnożenie w_0 i przyjętej powierzchni lustra ($1 m^2$). Obciążenie odpowiadające jednemu lustru (trzem węzłom) w zależności od prędkości wiatru i kąta przedstawione są w poniższej tabeli:

V [km/h]	F [N]			
	$\alpha = 45$ [deg]	$\alpha = 57.5$ [deg]	$\alpha = 70$ [deg]	$\alpha = 80$ [deg]
50	75	53	19	10
200	1200	840	297	159

Ostatecznie uzyskano wyniki, które są zaprezentowane na rys. 9. Wykres przedstawia tylko i wyłącznie wkład obciążenia wiatrowego w dewiacje luster (przedstawiono wyniki dla 10 luster dla których dewiacje były największe bezwzględnie).



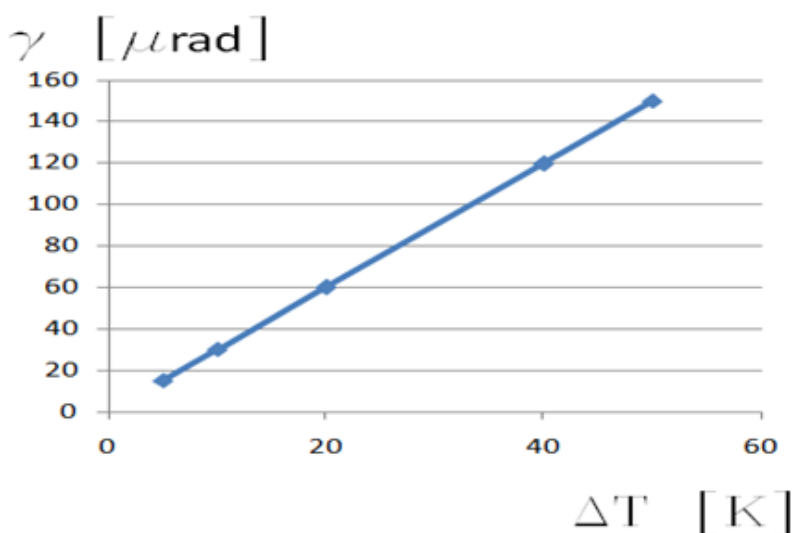
Rysunek 9: Dewiacje luster pod obciążeniem wiatrowym ($v = 50 \text{ km/h}$)

2.3 Obciążenie termiczne

Teleskop podczas pracy poddawany będzie typowym dobowym zmianom temperatury. Wykonano obliczenia dla przyrostów temperatury $\Delta T = 20$, -20 i -40 K . Uzyskane wyniki (dewiacje poszczególnych luster w μrad) przedstawiono w poniższej tabeli:

Mirror number	-40 K	-20 K	+20 K	Mirror number	-40 K	-20 K	+20 K
1	119,5	60	59,8	11	121,1	61	60,5
2	125,3	63	62,7	12	124,7	62	62,4
3	138,8	69	69,4	13	124,1	62	62,1
4	138,8	69	69,4	14	125,4	63	62,7
5	125,8	63	62,9	15	127,8	64	63,9
6	124,6	62	62,3	16	126,6	63	63,3
7	120,4	60	60,2	17	122,2	61	61,1
8	124,0	62	62,0	18	126,6	63	63,3
9	123,9	62	62,0	19	123,2	62	61,6
10	124,5	62	62,3				

Można zauważyć, że wartości odchyłeń poszczególnych luster nie różnią się od siebie znacząco, a także, że są liniowo zależne od przyrostu temperatury (przyjęto stały współczynnik rozszerzalności termicznej). Pozwolono sobie zatem na uproszczone (uśrednione dla wszystkich luster) przedstawienie zależności dewiacji luster od przyrostu temperatury (rys. 10). Zakładając, że jedynie zmiany temperatury powodują dewiację luster można stwierdzić, że przyrost ΔT powyżej 50 stopni dopiero uniemożliwia prowadzenie obserwacji.



Rysunek 10: Średni wpływ temperatury na dewiacje luster

2.4 Analiza modalna

Na zakończenie została przeprowadzona analiza modalna. Wg przyjętej specyfikacji dla teleskopów CTA najmniejsza częstość własna powinna być większa niż 3 Hz. Uzyskane wyniki mieszczą się w zakładanym przedziale, gdyż wynoszą:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= 3.6 \quad [Hz] \\
 f_2 &= 8.2 \quad [Hz] \\
 f_3 &= 8.3 \quad [Hz] \\
 f_4 &= 11.2 \quad [Hz] \\
 &\dots
 \end{aligned}$$

Pierwszej częstości odpowiada obrotowa postać modalna (ROTX), drugiej natomiast przemieszczenie w kierunku y (UY). Odpowiednio dla trzeciej - UX, UZ, ROTZ i czwartej - ROTY.

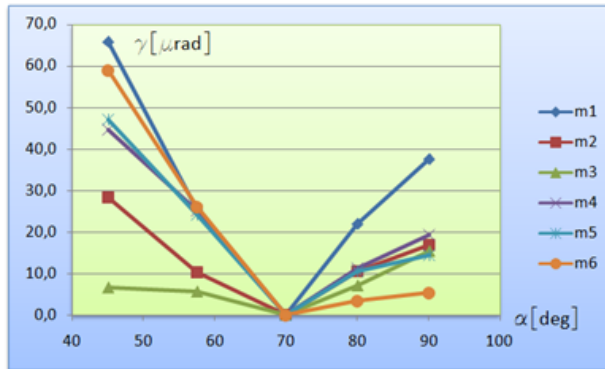


Rysunek 11: Postać modalna dla najmniejszej częstości własnej

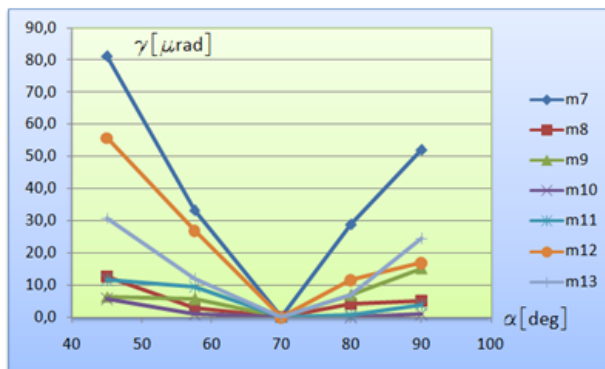
2.5 Przypadek złożony

Podsumowaniem przeprowadzonej analizy będzie przypadek złożony, na który składają się wszystkie typy obciążenia: wiatr, przyrost temperatury oraz ciężar własny. Obliczenia zostały przeprowadzone w celu uzyskania odpowiedzi czy w warunkach maksymalnego dopuszczalnego wiatru (50 km/h), dużej zmiany temperatury w nocy (-25 K) teleskop będzie mógł być wykorzystywany do obserwacji. Waga balansująca została przyjęta jako 35 kN. Uwzględniono dwa kierunki wiatru: wiatr wiejący czołowo (oznaczony dalej I) i wiatr wiejący od tyłu teleskopu (II).

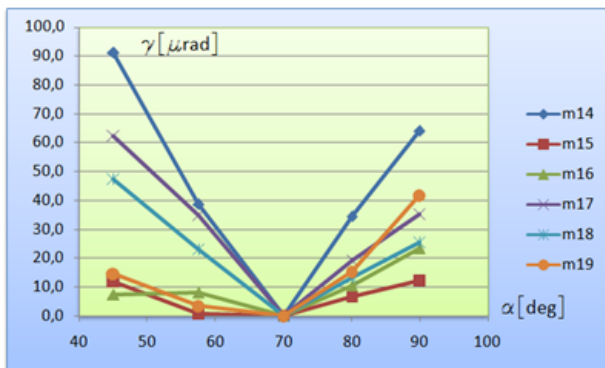
Uzyskane wyniki (rys. 12-17) pokazują, że w założonych warunkach teleskop powinien pracować poprawnie.



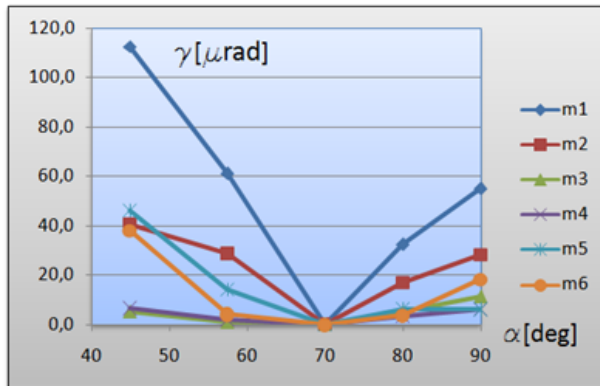
Rysunek 12: Dewiacje luster 1-6 dla złożonego przypadku obciążenia I



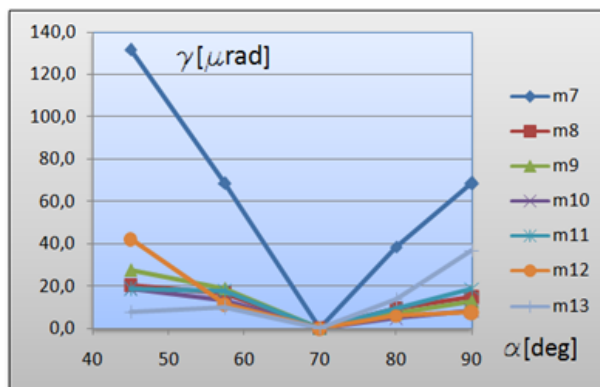
Rysunek 13: Dewiacje luster 7-13 dla złożonego przypadku obciążenia I



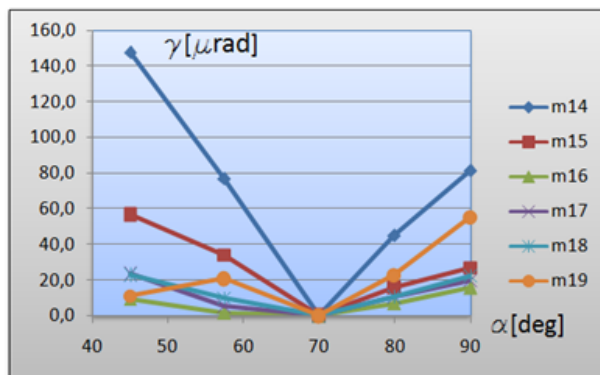
Rysunek 14: Dewiacje luster 14-19 dla złożonego przypadku obciążenia I



Rysunek 15: Dewiacje luster 1-6 dla złożonego przypadku obciążenia II



Rysunek 16: Dewiacje luster 7-13 dla złożonego przypadku obciążenia II



Rysunek 17: Dewiacje luster 14-19 dla złożonego przypadku obciążenia II

2.6 Analiza wytrzymałościowa

We wszystkich przypadkach rozważanych wcześniej naprężenia zredukowane nie przekraczały kilkudziesięciu MPa. Analiza wytrzymałościowa skoncentrowała się więc na określeniu ekstremalnego przypadku obciążenia i przeprowadzeniu dla niego obliczeń. Za najbardziej niebezpieczna dla konstrukcji sytuację przyjęto moment, gdy wiatr z prędkością 200 km/h uderza w czasie ustawioną horyzontalnie, a więc prostopadle do kierunku wiatru. Obciążenie każdego lustra w tym wypadku wynosiło 1930 N ($C = 0.8$). Maksymalne przemieszczenie czaszy dla takiego obciążenia wynosiło 2.6 mm. Lokalnie (w miejscach połączeń poszczególnych elementów czaszy) pojawiły się koncentracje naprężeń - naprężenia zredukowane (HMH) dochodziły do ok. 250 [MPa].

3 Podsumowanie

Została przeprowadzona analiza wytrzymałościowo-odkształceniowa jednego z proponowanych projektów teleskopów CTA. Analiza wykazała, że ów teleskop spełnia stawiane przed nim wymagania pod warunkiem zastosowania odpowiedniej przeciw wagi - nie mniejszej niż 2 x 2.5 t. Ponadto konstrukcja jest w stanie oprzeć się ekstremalnym czynnikom oddziałującym na nią pozostając w sprężystym zakresie odkształceń.

Literatura

- [1] <http://www.cta-observatory.org/>
- [2] Ruben Kankanyan, *Structure of a "small" telescope for CTA*, CTA Meeting Padova, Nov 3-5, 2008
- [3] Michael Panter, *Summary of the WP meeting April 14-16, 2008*
- [4] PN-64 B-02011, *Obciążenia wiatrem w obliczeniach statycznych*