ZMMiK Laboratorium 1 - analiza wyboczenia płaskiej płyty

1 Cel laboratorium

Celem ćwiczenia laboratoryjnego jest przeprowadzenie analizy wyboczeniowej płyty przedstawionej na rysunku 1 oraz porównanie wyników numerycznych z rozwiązaniem analitycznym. Wymiary i parametry materiałowe płyty są następujące

- a = 600 mm, b = 200 mm, t = 5 mm,
- $E = 2 \cdot 10^5 \,\mathrm{MPa}$, $\nu = 0.3$,
- p = 100 N/mm.



Rysunek 1: Modelowana geometria.

2 Przebieg analizy

2.1 Ustawienia projektu

1. W nowym projekcie zaczynamy od wybrania modułu Static Structural - Rysunek 2.

🔥 Unsaved Project - Workbench
File View Tools Units Extensions Jobs Help
Description Project
👔 Import 🗟 Reconnect 👔 Refresh Project 🖉 Update Project 📲 ACT Start Page
Toolbox 🗸 🗘 🗶 Project Schematic
□ Analysis Systems
🖉 Design Assessment
🔰 Eigenvalue Buckling
Electric
🕟 Explicit Dynamics
III Harmonic Acoustics
Normal Marmonic Response
🔟 Magnetostatic
🕎 Modal
🔢 Modal Acoustics
📶 Random Vibration
📶 Response Spectrum
🚾 Rigid Dynamics
B Static Acoustics
🐷 Static Structural
Steady-State Thermal
🔁 Thermal-Electric
Topology Optimization
🚾 Transient Structural
🔃 Transient Thermal

Rysunek 2: Wybór modułu Static Structural.

 Następnie należy dołożyć moduł *Eigenvalue Buckling* - 1.. W trakcie przeciągania modułu należy "nałożyć" go na moduł Static Structural - 2., Rysunek 3. Połączenia między modułami powinny wyglądać jak na rysunku 4.

File	View Tools Units Extensions	Jobs	н	elp	0					
1	Contract Con									
i 👔 I	👔 Import 🕹 Reconnect 👔 Refresh Project 🥖 Update Project 📲 ACT Start Page									
Toolbo	х — Т Х	Pro	ject	Sch	hematic					
	nalysis Systems	Г								
	Design Assessment									
$\mathbf{\Sigma}$	Eigenvalue Buckling			•	A					
٢	Electric			1	🚾 Static Structural					
J.	Explicit Dynamics			2	Engineering Data	× .			Share A2:A4	
Bo	Harmonic Acoustics			3	Geometry	2			Transfer A6	
\sim	Harmonic Response			4	Model	- 1				
00	Magnetostatic			-	W Model	- 4				
" "	Modal			5	Setup	* 4				
Bo	Modal Acoustics			6	🕼 Solution	2 🖌				
ad.	Random Vibration			7	😥 Results	?				
aid.	Response Spectrum		1		Static Structural	_				
~~	Rigid Dynamics	<u>ا</u> د	۰.		Static Structural					
Bo	Static Acoustics							-		
777-	Static Structural							2.		
	Steady-State Thermal									
61	Thermal-Electric									
	Topology Optimization									
777	Transient Structural									
	Transient Thermal									

Rysunek 3: Wybór modułu Eigenvalue Buckling.

🐧 Unsaved Project - Workbench									
File View Tools Units Extensions Jobs Help									
Compared Project									
🗿 Import 🛛 🏟 Reconnect 🔯 Refresh Project 🥖 Update Project 🛛 📲 ACT Start Page									
Toolbox 🔻 🕈 🗶 Proje	Toolbox 🗸 🗸 Project Schematic								
Analysis Systems									
🗹 Design Assessment									
😥 Eigenvalue Buckling	T	A	-	В					
(i) Electric	1 🚾 Static Str	uctural	1 [>	Eigenvalue Buckling					
💹 Explicit Dynamics	2 🥏 Engineeri	ng Data 🗸 🖌	a 2 🦪	Engineering Data	× .				
Harmonic Acoustics	3 Geometry	· ?	3	Geometry	9				
🐼 Harmonic Response				han tit	- 4				
🔘 Magnetostatic	4 💓 Model		4 😡	Model	- 👻 🔺				
🕎 Modal	5 🎡 Setup	?⊿ ∕	- 5 🔮	Setup	? 🖌				
📴 Modal Acoustics	6 👔 Solution	?	6 🅤	Solution	?				
📶 Random Vibration	7 🔗 Results		7 😪	Results	2.				
📶 Response Spectrum			•						
nigid Dynamics	Static Str	uctural		Eigenvalue Buckling					
BO Static Acoustics									

Rysunek 4: Poprawne połączenie modułów.

2.2 Geometria

1. Wybór programu do przygotowania geometrii: PPM na element Geometry \rightarrow New SpaceClaim Geometry - Rysunek 5.



Rysunek 5: Wybór programu do przygotowania geometrii.

- 2. Wybór nowego szkicu Rysunek 6: 1.
- 3. Wybranie płaszczyzny nowego szkicu, w tym przypadku płaszczyzna XY Rysunek 6: **2**.
- 4. Wybór widoku na szkic Rysunek 6: 3.



Rysunek 6: Przygotowanie szkicu.

- 5. Narysowanie prostokąta Rysunek 7: 1.
- 6. Przypisanie odpowiednich wymiarów, przełączanie między wymiarami przy pomocy klawisza *Tab* Rysunek 7: **2**.



Rysunek 7: Przygotowanie geometrii.

- 7. Wyjście ze szkicownika powoduje powstanie modelu powierzchniowego Rysunek 8: 1.
- 8. Nadanie grubości płaskiemu modelowi: zaznaczenie elementu Rysunek 8: 2, przypisanie grubości Rysunek 8: 3.



Rysunek 8: Utworzenie modelu powierzchniowego oraz nadanie grubości.

9. Proces przygotowania geometrii kończymy wychodząc z programu.

2.3 Siatka elementów skończonych

1. Przejście do programu Ansys Mechanical: należy otworzyć element Model - Rysunek 9.



Rysunek 9: Przejście do programu Ansys Mechanical.

- 2. Przygotowanie siatki elementów skończonych wybranie kształtu elementów Rysunek 10:
 - PPM na $Mesh \rightarrow Method$ Rysunek 10: 1.
 - Zaznaczenie geometrii płyty Rysunek 10: 2.
 - Zaznaczenie Quadrilateral Dominant Rysunek 10: 3.

S Multiple Systems - Mechanical [ANSYS Mechanical Enter	erprise]					
File Edit View Units Tools Help 🗵 🙆 🕶	💈 Solve 🔻 🚾 New Analysis 👻	?/ Show Errors 📋 👪	🔯 \Lambda 📦 🕶 🞒 Works	iheet in 🗞 🗌 🖓 🎰	👫 🏷 🕅 🕅	🔚 🖩 🖷 🚳 + 🖸 🕂 Q
F Show Vertices F Close Vertices 0,63 (Auto Scale)	✓ Wireframe □ Show	r Mesh 🎄 📕 Randon	Preferences 1 1		↔ Size ▼ 🔗 Location ▼	Convert - C Miscellaneous - O Tole
	Assembly Center	Edge Coloring 👻 🄏 🗸	1- h- h- h-	🖌 🕂 🕂 Thicken		
Mesh 😴 Update 🛛 🎕 Mesh 🔻 🎕 Mesh Control 🖛 🎕	Mesh Edit - Metric Graph	D Probe NO IN				
Outline		4	-			
Filter: Name						
🕞 🔊 🗛 🗉 🖨 Al		_				
m Model (A4, B4)						
B- A Geometry						
🕀 🖓 Materials						
Coordinate Systems						
E						
Static Structural (AS)						
Analysis Settings						
Solution (A6)						
Solution Information						
Eigenvalue Buckling (B5)						
Solution (B6)						
Solution Information						
						+
Details of "Automatic Method" - Method						
E Scope						
Scoping Method Geometry Selection						
Geometry 1 Body		2.				
Definition						
Suppressed No		- I -				
Method Quadrilateral Dominant		<u> </u>				
Element Order Use Global Setting						
Free Face Mesh Type Quad/Tri						

Rysunek 10: Wybranie kształtu elementów.

- 3. Przygotowanie siatki elementów skończonych wybranie wielkości elementów:
 - PPM na $Mesh \rightarrow Body Sizing$ Rysunek 11: 1.
 - wybranie zaznaczenia całego modelu i przypisanie go w *Scope:Geometry* Rysunek 11: 2.
 - Wpisanie w *Element Size* 50 mm Rysunek 11: 3.

	Show Mesh 🎄 📕 Random 🛞 Preferences 🛛 🗔 🛴 🛴	
Reset Explode Factor: Assembly Center	📕 Edge Coloring 👻 🋵 🌾 🎢 🖓	+ Thicken
Mesh 💈 Update 🏾 🍘 Mesh 👻 🔍 Mesh Control 👻 🍘 Mesh Edit 👻 🔐 Metric Grap	oh DProbe NO NO 👘 -	Ζ.
Dutline	4	
Filter: Name	Body Sizing	
	04.05.2025 10:07	
Project	Body Sizing	
		+
Details of "Body Sizing" - Sizing	4	
Scope		
Scope Scoping Method Geometry Selection		
Scopie Geometry Geometry Selection Geometry 1 Body 1		
Scoping Method Geometry Selection Geometry 1 Body Definition		
Scope Scoping Method Geometry Selection Geometry 1 Body Definition Suppressed No		
Stope Geometry I Body Definition Suppression Benerot Stop Reserved Stop		
Scope Scope Method Geometry Selection Geometry 1 Body Definition Supperside No Type Element Size Element Size Somma 3.		
Stope Scoop Method Geometry Selection Geometry I Body Demonstrate Commission		
Stope Scope Method Geometry Selection Geometry 1 Body Defention Suppress A No Type Benent Size Bonnet Size 0, mm Arbitictor Default Size 10 fault (0,2161 mm) Behavior Set		
Stope Scope Method Geometry Selection Geometry 1 Body Department The Element Size Element Size Ostault B,21651 mm) Confecture Size Default B,21651 mm) Rehavior 5 oft Geoweth Rate Default B,21631 mm)		
Stope Scope Method Geometry Selection Geometry 1 Body Definition Suppressed Port Element Size Port Element Size Control Size Port Size Port Size Port Size Soft Growth Size Default (2,1551 mm) Enhance Soft Growth Size Default (2,2551 mm) Enhance Soft Growth Size Default (2,3) Control Size Soft Soft Soft Size Soft Size	Geometry (Print Preview), Report Preview/	
Scope Scope Method Geometry Selection Geometry 100xy Depresend United Street Terment Select Street Advances 20 Default (0,21651 mm) Behavior 5 oft Geovert Rate Default (0,21651 mm) Behavior 5 oft Geovert Rate Default (0,21651 mm) Ceptore curvature 10 Ceptore curvature 10	\Geometry_(Print Preview_) Report Preview/	
Scope Scopen Method Geometry Sciencino Geometry 1 Body Definition Suppresent No Type Element Size Element Size S0, mm ArMARKO Defature Size Default (0,21651 mm) Gehavior Size Default (0,2) Group Rate Default (1,2) Copure Curvahure No Capture Proximity No	\Geometry_(Print Preview_) Report Preview/ Missages Text	Association IT

Rysunek 11: Przygotowanie parametrów siatki.

4. Przygotowanie siatki elementów skończonych - wybranie rzędu elementów: w opcjach elementu *Mesh* zaznaczyć *Element Order* \rightarrow *Linear* - Rysunek 12 2. Poniżej znajdują się statystyki siatki - 3.

	Coordi	nate Systems	
	Lim Agg Mesn	utomatic Mathed	•
		ody Sizing	
	E Static	Structural (A5)	
		nalysis Settings	
	- 10 n	isplacement	
	Ú. D	isplacement 2	
	Ú. D	isplacement 3	
	ω, μ	ine Pressure	
	<u>⊨</u> ⁄@ s	iolution (A6)	
	T-4	Solution Information	1
		🔞 Normal Stress	
	😑 🎸 📝 Eigen	value Buckling (B5)	
	™ Р	re-Stress (Static Structu	ral)
		nalysis Settings	
	⊡ % ፼ s	Solution (B6)	
		Solution Information	1
	/	Total Deformation	
De	etails of "Mesh"		4
	Display		
	Display Style	Use Geometry Setting	
	Defaults		
١.	Physics Preference	Mechanical	
ш	Element Order	Linear	2.
١.	Element Size	Default (43,301 mm)	
Ξ	Sizing		
E	Quality		
Ŧ	Inflation		
۰	Advanced		
•	Statistics		
1	Nodes	65	
	Elements	48	2
H			J.
L .			

Rysunek 12: Wybór liniowych elementów.

5. Utworzenie siatki elementów skończonych: PPM na $\mathit{Mesh} \to \mathit{Generate}$ Mesh. Efektem końcowym jest siatka jak na Rysunku 13



Rysunek 13: Siatka elementów skończonych.

2.4 Warunki brzegowe

- 1. Przypisanie warunków związanych z przemieszczeniem: PPM na Static Structural \rightarrow Displacement Rysunek 14
 - Warunek A: 4 krawędzie przemieszczenie na kierunku Z = 0, reszta Free
 - Warunek **B**: jedna krawędź na dole przemieszczenie na kierunku Y = 0, reszta Free ,
 - Warunek C: jeden **punkt** przemieszczenie na kierunku X = 0, reszta *Free*.

Show Vertices Fr Close Vertices 0.63 (Auto Scale)	Vireframe	Show Mesh	🎄 📕 Random	Preferences	<u> 1. 1. 1. 1. 1</u>
AT Ne Reset Explode Factor:	Assembly Center	Edge	Coloring V &v	1	
regenerated and the second and the second se	9 Candidana - 18 Disat			Ø1 Ø2 Ø3	20 2 11 1 • • •
Environment or inertial • or Loads • or Supports • ·	a conditions + a Direct r	⊒∎ * ™ 			
Filter: Name ▼			A: Static Structur Static Structural Time: 1, s	al	
Project P			04.05.2025 10:21	23	
Johnile of "Static Stauctural (AS)"					
Definition					
Physics Type Structural					
Analysis Type Static Structural					
Solver Target Mechanical APDL					
Options					
Options Environment Temperature 22, °C					

Rysunek 14: Warunki brzegowe związane z przemieszczeniem.

 Przypisanie warunku związanego z obciążeniem tarczy: PPM na Static Structural → Line Pressure Rysunek 15: 1. Wybór górnej krawędzi, oraz zdefiniowanie obciążenia poprzez składowe: Rysunek 15: 2.

	1		15	1 m		
₽ Show Vertices	后 Close Vertices	0,64 (Auto Scale)	✓ [™] ^Q Wireframe	Show Mesh	🔆 🕌 Random 🛛 🖗 Prefe	erences 🗁 🕁 🕁 🕁 📦
≹İ ()← Reset Exp	plode Factor:		Assembly Center		Coloring \checkmark $/_0 \checkmark$ $/_1 \checkmark$ $/_2$	- /₃- /₃- 💉 🙌 🕂 Thicken
Environment 🔍 In	ertial 🔻 🔍 Loads 🔻	🔍 Supports 🔻	🗣 Conditions 🔻 🌒 Dire	ect FE 👻 💼		
utline				4		
Filter Name	-				A: Static Structural	
	- -				Line Pressure	
🕑 🕢 12° 🗄 🖁	2 2				04.05.2025 10:22	
Project					04.05.2025 10.22	
Fiodel (A4	6, 64) etry				Line Pressure: 100, N/mn	m 🗾
H- Materi	ials				Components: 0,;-100,;0, I	N/mm
E Coord	inate Systems					
- An Mesh						
- @ /	Automatic Method					
Q_ E	Body Sizing					
😑 🌾 🗐 Stati	c Structural (A5)					
~~~ / A /	Analysis Settings					
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	Displacement					
	Displacement 2					
	Displacement 3	1				
,00, (Displacement 3 Line Pressure	1.				
	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6)	1.				
	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) Solution Informati Nalue Buckling (B5)	1.				
	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) Solution Informati Invalue Buckling (B5) Pre-Stress (Static Struc	ion tural)				
	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) Solution Informati Invalue Buckling (B5) Pre-Stress (Static Struc Analysis Settings	1. ion tural)				
	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) Solution Informati Invalue Buckling (B5) Pre-Stress (Static Struc Analysis Settings Solution (B6)	ion .tural)				
	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) Solution Informati ivalue Buckling (B5) Pre-Stress (Static Struc Analysis Settings Solution (B6)	ion .tural)				
	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) (*) Solution Informati Ivalue Buckling (B5) Pre-Stress (Static Struc Analysis Settings Solution (B6) (*) Solution Informati	ion (tural)				
	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) Million Informati value Buckling (B5) Pre-Stres (Static Struc Analysis Settings Solution (B6) Million (B6) Solution Informati	ion (tural)			_	
tails of "Line Press	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) Million Informati value Buckling (B5) Pre-Stress (Static Struc Analysis Settings Solution (B6) Million (B6) Solution Informati	1. (tural)		ą.	2.	
tails of "Line Press	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) Colution Informati Value Buckling (B5) Pre-Stress (Static Struc Analysis Settings Solution (B6) Colution Informati	1. ion .tura)		ø	2.	l.
etails of Line Press Scope Scoping Method	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) (1) Solution Informati Value Buckling (B5) Pre-Stress (Static Struc Analysis Settings Solution (B6) (1) Solution Informati ure Geometry Selection	1. ion itura)		a	2.	
talik of "Line Press Scoping Method Geometry	Displacement 3 Inter Pressure Solution (AG) Solution Informati Pre-Stress (Static Struc Anaylasis Settings Solution (BG) Comments Solution Informati Unc Geometry Selection 1 Edge	1. ion .tura)		0	2.	
tails of "Line Press Scope Scoping Method Geometry Definition	Deplacement 3 Inter Pressure Solution (A6) vij Solution Informati value Bucklung (BS) Pre-Stress (State Strus Analysis Settings Solution (B6) Geometry Selection 1 Edge	1. ion :tura)		0	2.	
etails of "Line Press Scope Scoping Method Geometry Definition ID Definition	Deplacement 3 Line Pressure Solution (A6)	1. ion .tura)		4	2.	
tails of "Line Press Scope Scoping Method Geometry Definition Type Notes Di	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) ¹¹ ¹² Solution Information Value Buckling (IS3) Pre-Stress (Static Strug Solution Information Solution (A6) ¹² ¹³ ¹⁴ ¹⁴ ¹⁵	1. ion turai)		8	2.	
chilk of Suite Press Scope Scoping Method Ceometry Definition ID (Beta) Type Define By	Deplacement 3 Line Pressure Solution (A6)	1. ion tura) ion		0	2.	
tails of Tkine Press Scope Scoping Method Geometry Definition ID (Beta) Type Definition Definite System	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) (************************************	1. ion itural) ion			2.	
tails of "Line Press Scope Scoping Method Geometry Definition ID (Beta) Type Define By Coordinate System	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) ¹¹ ¹² Solution Informative Nature (A6) ¹² Solution Informative ¹³ Solution Informative ¹³ Solution Informative ¹⁴ Solution Informative ¹⁴ Solution Informative ¹⁴ Solution Informative ¹⁵ Solution Informative ¹⁵ Solution Informative ¹⁵ Solution Informative ¹⁶ Solutio	1. ion tural) ion		0	2.	
saile of "Line Press Scoping Method Geometry Definition ID (Beta) Type Definition ID (Beta) Type Coordinate System X Component	Displacement 3 Line Pressure Solution (A6) (1) Solution Information walue Eucking (185) Fee-Stress (Static Struc Analysis Settings Solution (B6) Solution Information 1 Edge 43 Line Pressure Components Global Coordinate 100, Nimm (ramped) -100, Nimm (ramped)	1. ion itural) ion System		0	2. ∞	
ctails of "Line Press Scope Scoping Method Geometry Definition 10 (Beta) Type Define By Component V Component	Displacement 3 Solution (A6) Value Bruckling (B5) Pre-Stress (State Strucg Solution Informative Solution (B6) Solution Informative Solution In	1. ion tural) ion System		2	2. Georgety (Depte Departs) 0	

Rysunek 15: Przypisanie obciążenia tarczy.

2.5 Obliczenia statyczne

- 1. Rozwiązanie zadania statycznego: PPM na Solution $A6 \rightarrow Solve$
- 2. Prezentacja wyników Rysunek 16:
 - PPM na Solution \rightarrow Stress \rightarrow Normal Rysunek 16: **1**.
 - Zmiana składowej na *Y* Rysunek 16: 2.
 - PPM na Solution \rightarrow Evaluate all results



Rysunek 16: Przedstawienie naprężeń.

2.6 Obliczenia wyboczenia

1. Ustawienie parametrów analizy wyboczeniowej - Rysunek 17: 1. Wybranie 10 pierwszych postaci wyboczenia oraz ograniczenie tylko do dodatnich współczynników - Rysunek 17: 2.

	Image: Second State Structural Image: Second Structural					
þ	etails of "Analysis Settings"		4			
E	Options					
L	Max Modes to Find	10,				
Ŀ	Solver Controls	·				
L	Solver Type	Program Controlled				
	Include Negative Load Multiplier	No	2. 🗉			
Ð	Output Controls					
Ð	Analysis Data Management					

Rysunek 17: Ustawienia analizy.

- 2. Rozwiązanie zadania: PPM na Solution $B6 \rightarrow Solve$.
- 3. Przedstawienie deformacji: Rysunek 18:
 - PPM na Solution \rightarrow Deformation \rightarrow Total
 - PPM na Solution \rightarrow Evaluate all results Rysunek 18: 1.
 - Kolejne postaci wyboczenia można zmieniać w Mode Rysunek 18: 2.



Rysunek 18: Prezentacja postaci wyboczenia.

4. Postaci można też zmieniać z poziomu wykresu mnożnika obciążenia: Rysunek 19.

Graph			4 Tabul	ar Data
Animation A D 20 Frames	▼ 2 Sec (Auto)	▼ 🏣 🗨	5 N 1 1, 2 2	Aode J <u>Load Multiplier</u> , 24,562 27,652
134,93 50, - 0, - 1 2 3 4	5 6	7 8 9		Copy Cell Retrieve This Result Create Results Create Mode Shape Results Export
Messages Graph			9	Select All

Rysunek 19: Postaci wyboczenia.

2.7 Praca zakrytyczna

1. Aby przeprowadzić analizę pracy zakrytyczną należy dodać nowy moduł *Static Structural* i połączyć go z modułem *Eigenvalue Buckling* tak, jak pokazano na Rysunku 20.



Rysunek 20: Schemat projektu.

2. We właściwościach bloku *Solution* znajdującego się w module *Eigenvalue Buckling* należy zmienić *Scale Factor* - Rysunek 21.

Properti	es of Schematic B6: Solution	▼ ₽ X
	А	В
1	Property	Value
2	General	
3	Component ID	Solution 1
4	Directory Name	SYS-1
5	Update Condition Parameter (Beta)	None
6	Notes	
7	Notes	
8	Used Licenses	
9	Last Update Used Licenses	ansys
10	 System Information 	
11	Physics	Structural
12	Analysis	Eigenvalue Buckling
13	Solver	Mechanical APDL
14	Solution Process	
15	Update Option	Use application default
16	Solve Process Setting	My Computer
17	Queue	
18	 Update Settings for Static Structural (Co 	mponent ID: Model 2)
19	Process Nodal Components	
20	Nodal Component Key	
21	Process Element Components	
22	Element Component Key	
23	Scale Factor	0,0001
24	Mode	1

Rysunek 21: Wybranie współczynnika przeskalowania wstępnej imperfekcji.

3. PPM na Solution w Eigenvalue Buckling \rightarrow Update. Po pojawieniu się zielonych checkmarków należy otworzyć Model w nowym module.

 Program zachowuje ustawienia siatki i materiałów Rysunek 22: 1, ale należy ponownie nadać warunki podparcia - takie same jak w zadaniu podstawowym (Rozdział 2.4). Uwaga: tym razem zadajemy ciśnienie o wartości -2750 N/mm - Rysunek 22: 2.



Rysunek 22: Wprowadzenie warunków brzegowych w nowej analizie.

5. Analiza musi zostać przeprowadzona z uwzględnieniem dużych przemieszczeń. Powoduje to wymóg przeprowadzenia analizy w podkrokach. Ustawienia *Analysis Settings* przedstawiono na Rysunku 23. **Uwaga:** dla dokładniejszej siatki można zmniejszyć liczbę podkroków.

۵	Details of "Analysis Settings"				
F	Step Controls			^	
	Number Of Steps	1,			
L	Current Step Number	1,			
١.	Step End Time	1, s			
	Auto Time Stepping	On			
	Define By	Substeps			
	Initial Substeps	200,			
	Minimum Substeps	200,			
	Maximum Substeps	250,			
l	Solver Controls				
	Solver Type	Program Controlled			
	Weak Springs	Off			
	Solver Pivot Checking	Program Controlled			
	Large Deflection	On		¥	
N	lanage Views		д	x	
S	ection Planes		д	x	



6. Rozwiązanie zadania: PPM na Solution $C5 \rightarrow Solve$.

7. Przedstawienie wyników całkowitej deformacji: Rysunek 24.



Rysunek 24: Praca zakrytyczna - przemieszczenia całkowite.

8. Wyniki można zapisywać przy pomocy opcji *Image to File* - Rysunek 25. Uwaga: zapisywany jest obecny widok.

🔯 C : Static Structural - Mechanical [ANSYS Mechanical Enterprise]	
] File Edit View Units Tools Help 🛛 🗔 🧭 ⊷: 🛛 🐬 Solve 🔻 🚾 New Analysis ▼ ?√ Sh	iow Errors 🏥 📷 🔯 🖪 🕡 🗸 🖤 Worksheet ix 🗞 🐁 🗍 🖤 🖊
🖵 🗹 Show Vertices 🞢 Close Vertices 0,61 (Auto Scale) 🚽 🎝 Wireframe 🏻 🗄 Show Mes	h 🎠 🕌 Random 🔗 Prefe 🞯 Figure 🍺
] 🐖 ()← Reset Explode Factor:)────────────────────────────────────	e Coloring 🔻 🄏 🗸 🎵 🕼 Image
Result 5,1e+002 (Auto Scale) 🗨 📦 🕶 🔮 🕈 👘 📾 💷 Probe Display	Scoped Bodies
Outline 7	Image to File
Filter: Name 💌	C: Static Structural
] 🔁 🖉 🐎 ⊞ 🛜 😫	Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Rysunek 25: Zapisywanie obrazów.

- 9. W kolejnym kroku przygotowany zostanie wykres siła-przemieszczenie. W tym celu należy w pierwszym kroku zdefiniować dwa nowe rezultaty:
 - Siła reakcji: PPM na Solution → Insert → Probe → Force Reaction. W Boundary Condition zaznaczyć warunek brzegowy odpowiadający odebraniu przemieszczeń na kierunku Y dolnej krawędzi - Rysunek 26: 1.
 - Przemieszczenie górnej krawędzi: PPM na Solution → Insert → User Defined Results. W pierwszej kolejności w Geometry należy zaznaczyć górną krawędź. Następnie w Expression należy wpisać: -1*UY Rysunek 26: 2.

1.				
Details of "Force Rear	ction"		n.	
- Definition			~	
Type	Force Reaction			
Location Method	Boundary Condition			
Boundary Conditio	Displacement 2			
Orientation	Global Coordinate System			
Suppressed	No		r	
- Options				Force Reaction
Result Selection	All			
Display Time	End Time			
+ Results				
Maximum Value 0	lver Time			
X Axis				Geometry (Print Preview) Report Preview
Y Axis				[Coconcert]// mit reven//neport review/
Z Axis			~	Graph
Manage Views		P :	×	
Section Planes		# :	×	
2.				
Details of "User Defin	ed Result"		ņ	
Scope			^	
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	1 Edge			
Sub Scope By	Layer		П	
Layer	Entire Section			
Position	Top/Bottom			
- Definition				
Туре	User Defined Result			
Expression	= -1*UY			
Input Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA)			
Output Unit				
By	Time			Geometry (Print Preview) Report Preview
Display Time	Last			
Coordinate System	Global Coordinate System		~	Graph
Manage Views		# :	×	
Section Planes		# :	×	
1 +1 = 10 - 1 - 1				

Rysunek 26: Przygotwanie wyników do wykresu.

- Dodanie wykresu Rysunek 27: 1.
- W *Outline Selection* należy zaznaczyć oba wyniki przygotwane w poprzednim kroku Rysunek 27: 2.
- Ustawienia osi wprowadzić tak jak na Rysunku 27: 3.

● Analysis ▼ ?√ Show	v Errors 🏥 👪 🚺 A 🐠	🕶 🌒 Work
□ Show Mesh	🙏 📕 Random 🛛 New Chart.	and Table
- Edge (Coloring - L - L - L -	1 - 1 -
2.		
Force R R User De	eaction fined Result	
etails of "Chart"		
Definition		
Outline Selection	Apply	Cancel
Chart Controls		
X Axis	Time	
Details of "Chart"		
Details of "Chart"		
Details of "Chart" Definition Outline Selection	2 Objects	
Details of "Chart" Definition Outline Selection Chart Controls	2 Objects	
Details of "Chart" Definition Outline Selection Chart Controls X Axis	2 Objects User Defined Result (Max)	
Details of "Chart" Definition Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style	2 Objects User Defined Result (Max) Both	
Details of "Chart" Definition Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear	
Details of "Chart" Detinition Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridlines	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both	
Details of "Chart" Details of "Chart" Detinition Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridines Axis Labels	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both	
Details of "Chart" Details of "Chart" Details of "Chart Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridlines Axis Labels X-Axis	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both	
Details of "Chart" Definition Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Griddines Axis Labels X-Axis Y-Axis Y-Axis	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both	
Details of "Chart" Details of "Chart" Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridlines Axis Labels X-Axis Y-Axis Report Chart	2 Objects User Defined Result (Max) Both Both	
Details of "Chart" Details of "Chart" Details of "Chart Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridines Axis Labels X-Axis Y-Axis Report Content Content Content	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both Chart And Tabular Data	
Details of "Chart" Details of "Chart" Details of "Chart" Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridlines Axis Labels X-Axis Y-Axis Y-Axis Report Content Caption Inst. Constitue	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both Chart And Tabular Data	
Details of "Chart" Definition Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridlines Axis is Labels X-Axis Y-Axis Report Content Caption Imput Quantities Time	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both Chart And Tabular Data	
Details of "Chart" Details of "Chart" Details of "Chart Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridlines Axis Labels X-Axis Report Content Caption Input Quantities Time Output Quantities Details Quantitie	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both Chart And Tabular Data Omit	
Details of "Chart" Details of "Chart" Details of "Chart Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridlines X.Axis Y.Axis Y.Axis Report Content Caption Input Quantities Time Output Quantities [Al Force Reaction 00]	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both Chart And Tabular Data Omit	
Details of "Chart" Details of "Chart" Details of "Chart" Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridlines Axis tabels X-Axis Y-Axis Y-Axis Report Content Caption Input Quantities Time Output Quantities [A] Force Reaction (A) [B] Force Reaction (A)	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both Chart And Tabular Data Omit Omit Display	
Details of "Chart" Definition Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridlines Axis is Labels X-Axis Y-Axis Report Content Caption Ime Time Output Quantities Time (A) Force Reaction (X) (B) Force Reaction (Y) (C) Force Reaction (Y)	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both Chart And Tabular Data Omit Omit Display Omit	
Details of "Chart" Details of "Chart" Details of "Chart Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridlines Axis Labels X-Axis Report Content Caption Input Quantities Time Output Quantities [A) Force Reaction (X) [B] Force Reaction (X) [B] Force Reaction (X) [C] Force Reaction (Z) [2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both Chart And Tabular Data Omit Omit Display Omit Omit Omit	
Details of "Chart" Details of "Chart" Details of "Chart Outline Selection Chart Controls X Axis Plot Style Scale Gridlines XAxis Y-Axis XAxis Report Content Caption Input Quantities Time Output Quantities [Ime Quantities [Ime Quantities [Ime Quantities] [B] Force Reaction (X) [B] Force Reaction (Z) [D] Force Reaction (Total) [E] User Defined Result (Min)	2 Objects User Defined Result (Max) Both Linear Both Chart And Tabular Data Omit Omit Display Omit Omit Omit Omit Omit	

Rysunek 27: Przygotwanie wykresu.

• Efektem końcowym jest wykres Siła - Przemieszczenie, na którym wyraźnie widać przejście w stan pracy zakrytycznej - Rysunek 28.



Rysunek 28: Wykres Siła - Przemieszczenie.

3 Zadania do wykonania

1. Sprawdzić wpływ gęstości siatki oraz rzędu elementu na uzyskane wyniki:

Element	Element order: Linear			Element order: Quadratic		
size [mm]	L.	L. Węzłów	Mnożnik	L.	L. Węzłów	Mnożnik
	Elementów			Elementów		
50	48	65	24.562			
25						
15						
10						
5						
2.5						

2. Porównać wyniki numeryczne z wyznaczonym analitycznie najmniejszym (pierwszym) mnożnikiem obciążenia krytycznego dla analizowanej płyty:

$$N_{cr} = k_{\min} \frac{\pi^2 D}{a^2} \tag{1}$$

Gdzie D to sztywność płytowa zależna od materiału i geometrii:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$
(2)

k to współczynnik wyboczenia:

$$k = \left(\frac{na}{b} + \frac{m^2b}{na}\right)^2 \tag{3}$$

moraz nsą to liczby półfal odpowiednio wzdłuż wymiaru aib płyty. Szukając najmniejszego mnożnika należy przyjąć m = 1oraz znaleźć takie n, które minimalizuje k. Kolejne pary min odpowiadają następnym postaciom wyboczenia (a więc i mnożnikom). Uwaga: $m, n \in \mathbb{N}$.

Obciążenie krytyczne N_{cr} odnosimy do przyłożonego obciążenia, stąd ostatecznie mnożnik obciążenia λ :

$$\lambda = \frac{N_{cr}}{p} \tag{4}$$