מפעל מנועים

Turbo shaft Aero Engine Modeling Using NPSS Software

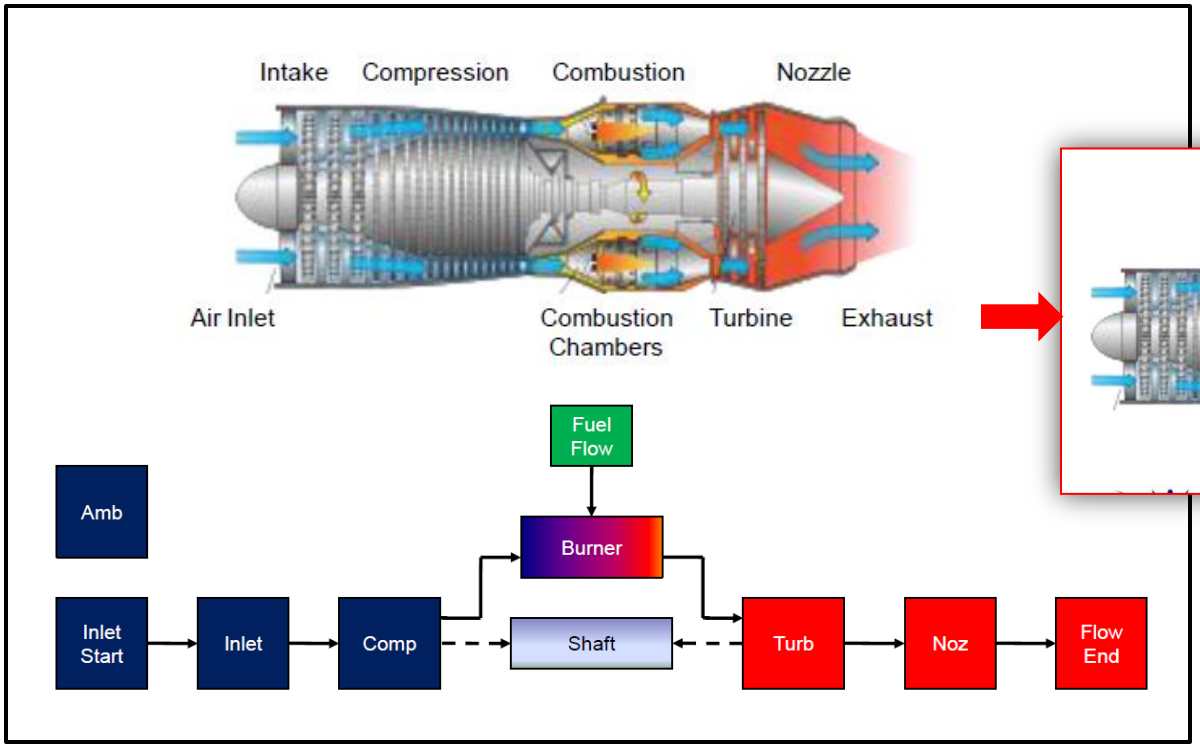
17.11.16

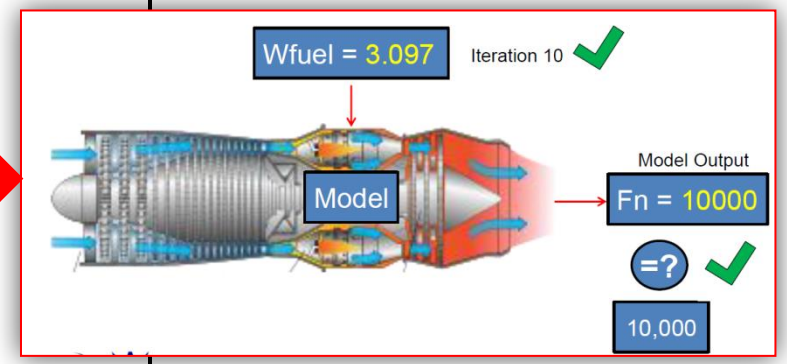
Engines Division
New Product Development

לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

What is NPSS?

Numerical Propulsion System Simulation (NPSS) *is an object-oriented, multi-physics, engineering design and simulation environment that enables development, collaboration and seamless integration of system models*



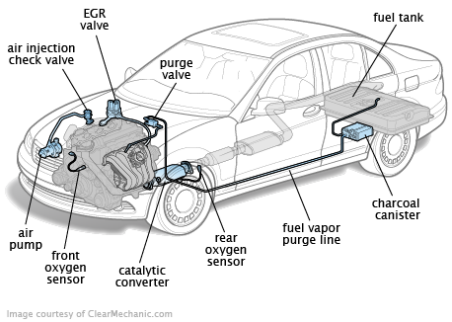


לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

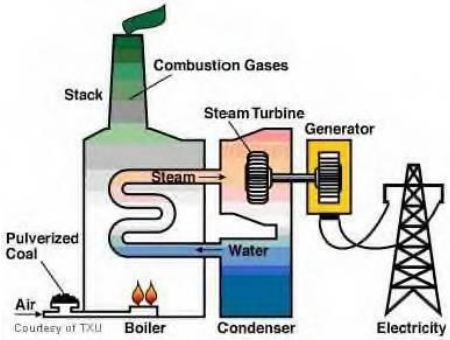
NPSS Applications

NPSS was developed by NASA for aircraft propulsion… However, NPSS is:

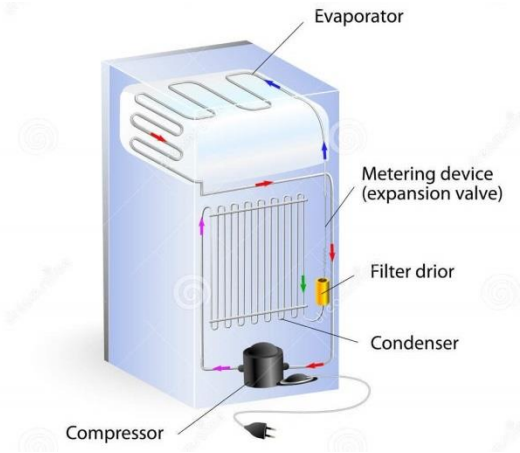
- ✓ C++ based tool
- ✓ Flow-network solver
- ✓ Elements based model



Vehicle Emission Analyses



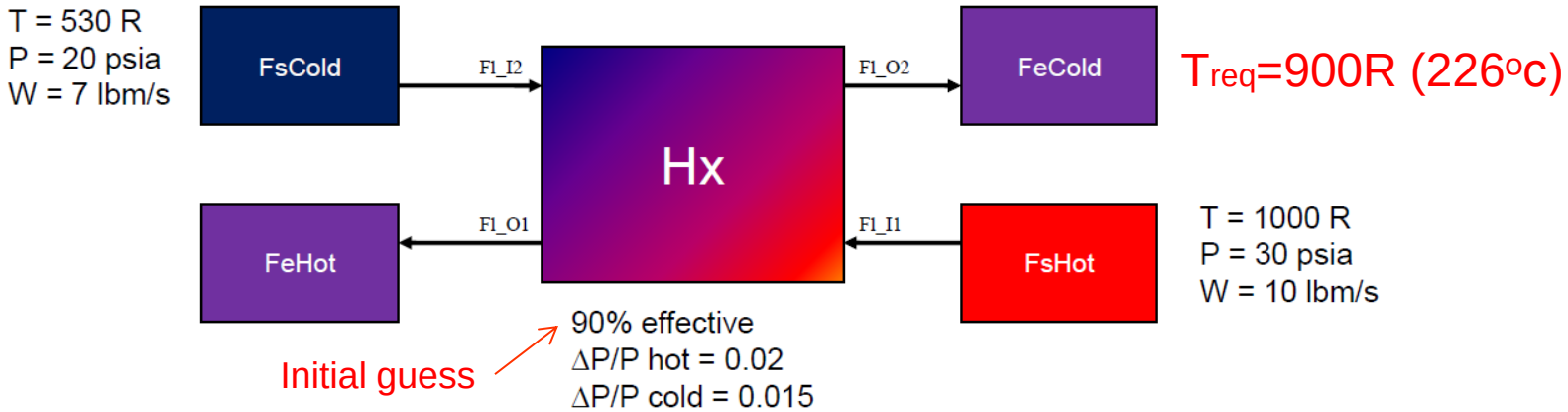
Power Cycles



Refrigeration Cycles

לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Heat Exchanger Example



What would be the effectiveness to achieve a desired cold stream outlet temperature of 900R using conditions from diagram?

1) Build a model
2) Use a solver (iteration):

Independent (variable)	Dependent (target)	Constraint (Limit)
Hx Effectiveness	FeCold Temp.	99% max.

לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Heat Exchanger Example - Model

```
//-----------------------------------------------------------------------
//                              Model Definition
//-----------------------------------------------------------------------

// Start the flow of hot air

Element FlowStart FsHot {
    Pt = 30.0; // psi
    Tt = 1000.; // R
    W = 10.; // lbm/s
}

// Start the flow of cold air

Element FlowStart FsCold {
    Pt = 20.0; // psi
    Tt = 530.; // R
    W = 7.; // lbm/s
}

// Instantiate Heat Exchanger Element

Element HeatExchanger Hx {

    switchQcalc = "EFFECT"; // "Q" or "EFFECT"

    //Q_in = 500; // BTU/s, user input heat transfer rate if switchQcalc = "Q"
    effect = 0.9; // user input effectiveness if switchQcalc = "EFFECT"
    dPqP1 = 0.02; // relative pressure drop for stream 1, (Pin - Pout)/Pin
    dPqP2 = 0.015; // relative pressure drop for stream 2, (Pin - Pout)/Pin

    // Declare a real variable that is a requested outlet temperature for the cold streams.
    // Used only when the dep_ToutCold solver balance is turned on.
    real ToutCold_req;
}

// End the flow of hot air stream

Element FlowEnd FeHot;

// End the flow of cold air stream

Element FlowEnd FeCold;

```


לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Heat Exchanger Example – Solver Setup

```
//-----------------------------------------------------------------------
//                              Solver Variables
//-----------------------------------------------------------------------

// Declare a solver independent variable that varies heat exchanger effectiveness
// Only works if switchQcalc = "EFFECT"
Independent ind_effect{
    varName = "Hx.effect";
}

// Declare a solver dependent variable that targets cold stream outlet temperature
Dependent dep_ToutCold {
        eq_lhs = "Hx.Fl_O2.Tt"; // actual cold stream outlet temperature
        eq_rhs = "Hx.ToutCold_req"; // target temperature
}


// Declare a solver dependent variable to be used as a constraint
Dependent dep_effectMax {
        eq_lhs = "Hx.effect"; // actual heat exchanger effectiveness
        eq_rhs = "0.99"; // set maximum allowable heat exchanger effectiveness
}

// Apply the effectMax constraint to the dep_ToutHot solver dependent
// and specify it as a maximum allowable value
dep_ToutCold.addConstraint( "dep_effectMax", "MAX");

```


לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Heat Exchanger Example – Results

Administrator: CMD window with NPSS environment

```
=====  RUNNING THE MODEL (NOM)  ======

Solver Indep and Dep variables

{ }

{ }

Heat Exchanger

F010.Tt = 1000
F010.Pt = 30
F010.W = 10

F030.Tt = 530
F030.Pt = 20
F030.W = 7

F020.Tt = 706.427
F020.Pt = 29.4
F020.W = 10

F040.Tt = 953
F040.Pt = 19.7
F040.W = 7

Hx.switchQcalc = EFFECT

Hx.effect = 0.9
Hx.Q = 718.649

Solver converged? = 1
Constraints Active? = 0
Constraints Hit =
```

Administrator: CMD window with NPSS environment

```
=====  RUNNING THE MODEL (900R)  ======

Solver Indep and Dep variables

{"ind_effect" }

{"dep_ToutCold" }

Heat Exchanger

F010.Tt = 1000
F010.Pt = 30
F010.W = 10

F030.Tt = 530
F030.Pt = 20
F030.W = 7

F020.Tt = 744.211
F020.Pt = 29.4
F020.W = 10

F040.Tt = 900
F040.Pt = 19.7
F040.W = 7

Hx.switchQcalc = EFFECT

Hx.effect = 0.787234
Hx.Q = 627.198

Solver converged? = 1
Constraints Active? = 0
Constraints Hit =
```

Administrator: CMD window with NPSS environment

```
=====  RUNNING THE MODEL (1100R)  =====

Solver Indep and Dep variables

{"ind_effect" }

{"dep_effectMax" }

Heat Exchanger

F010.Tt = 1000
F010.Pt = 30
F010.W = 10

F030.Tt = 530
F030.Pt = 20
F030.W = 7

F020.Tt = 676.041
F020.Pt = 29.4
F020.W = 10

F040.Tt = 995.3
F040.Pt = 19.7
F040.W = 7

Hx.switchQcalc = EFFECT

Hx.effect = 0.99
Hx.Q = 792.04

Solver converged? = 1
Constraints Active? = 1
Constraints Hit =
        Constraint 'dep_effectMax' overrides Target 'dep_ToutCold'.
```

Case 1- Nominal

Effect=0.9

T_{FeCold}=953R

No solver setup

Case 2- 900R

Effect=0.78

T_{FeCold}=900R

Low Hx. eff. for 900R

Case 3- 1000R

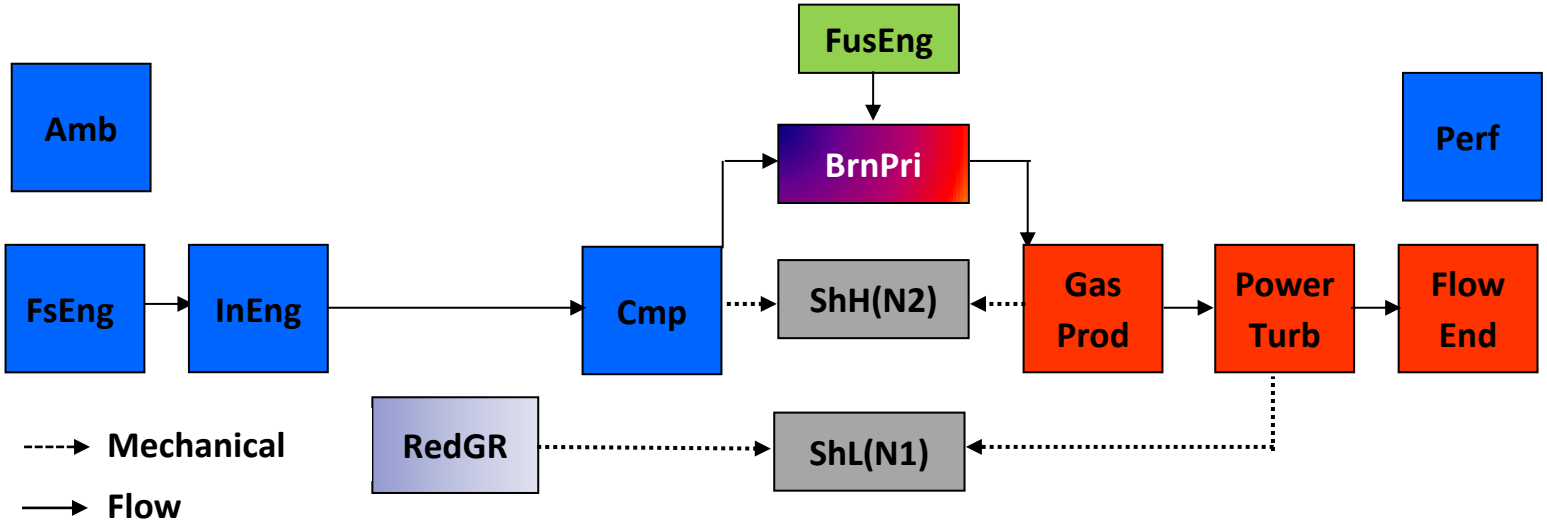
Effect=0.99

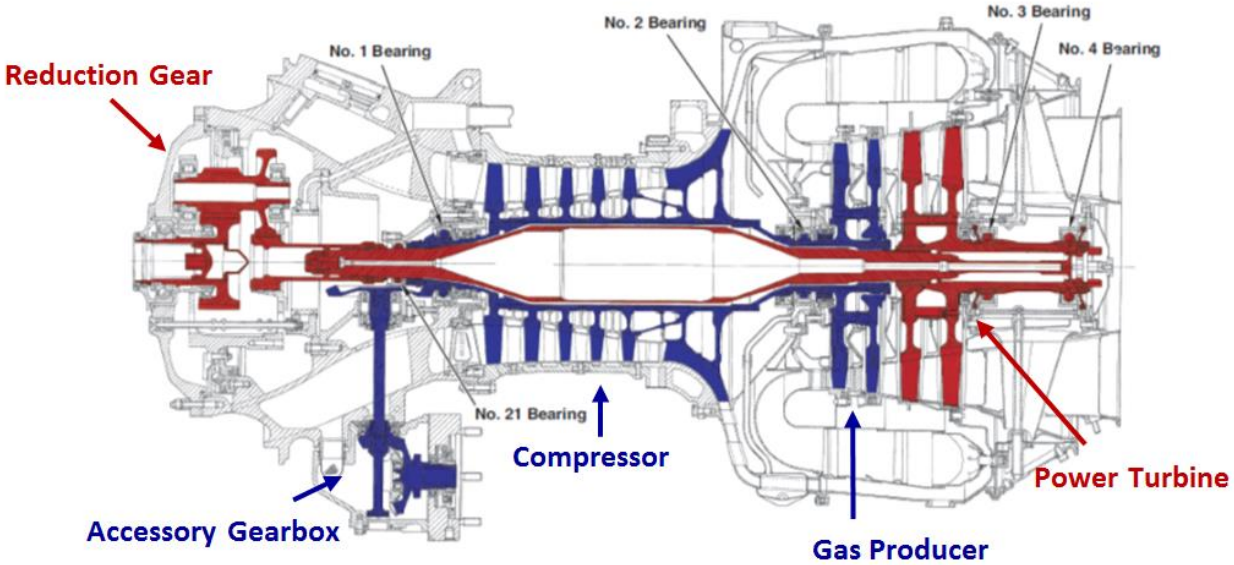
T_{FeCold}=995R (280°c)

Solver constraint active, 1000R isn't feasible

לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Turboshaft Aero Engine Example





לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Turboshaft Example – Model Definition

Model Definition

- Dual spool turboshaft
- No bleeds required (T/O design point)

Notable Design Point Input

Engine Air Flow	11.2 [lb/sec]
Engine Pressure Ratio	7.14
Compressor Isent. Effi.	0.798
Turbine Inlet Temp.	1021°c
Output Shaft hp	1400hp

Solver Variables

Independent	Dependent	Constraint
Fuel Flow	T_4=1021°c	--
Red.Gr trq	hp=1400	--
Gas Prod. PR	ShL trq=0	--
Power Turb. PR	ShH trq=0	--

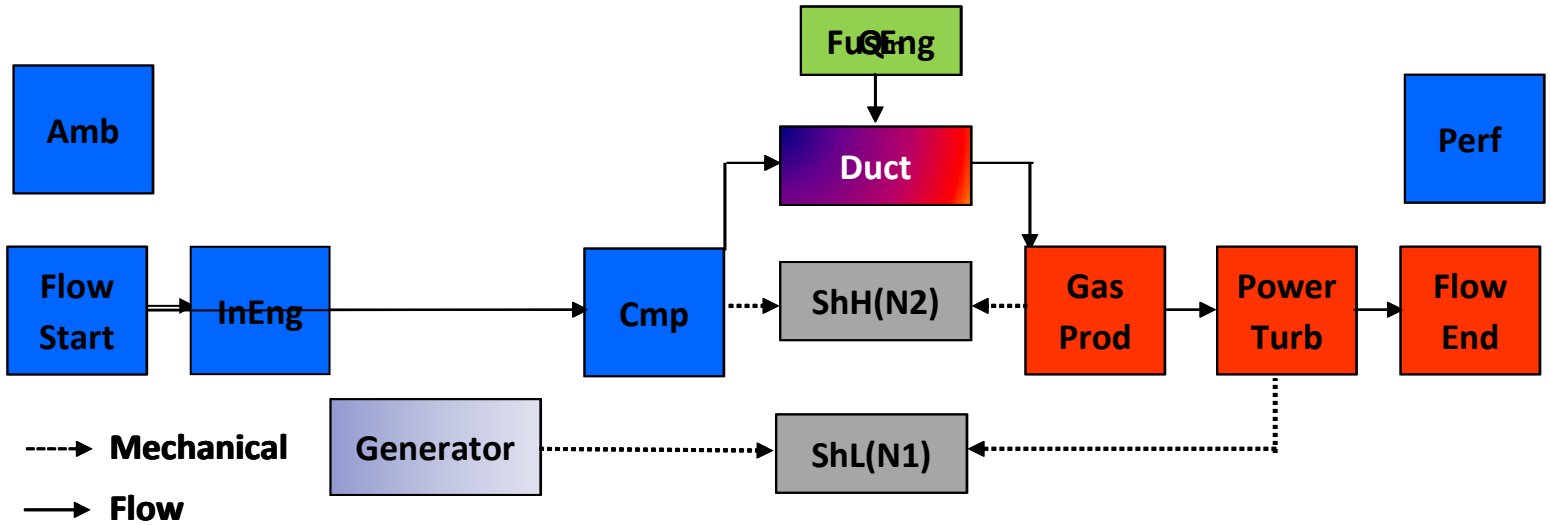
SFC	0.615[lb/hr/hp]
Thermal Efficiency	22.3%
Output Shaft hp	1400hp

מפעל מנועים IAI

לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Power Generation Cycles Example

Power Generation Gas Turbine



- ✓ Dual spool power generation gas turbine of ~1MW with no burner
- ✓ Duct pressure loss = burner pressure loss
- Generator efficiency = 100%

✓ Customized Elements - Generator

לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Modular Input Files

C:\NPSS\T53\T53.run - Notepad++ [Administrator]

File Edit Search View Encoding Language Settings Macro Run Plugins Window ?

T53.run | T53.mdl | printT53.view | printT53.fnc | T53.out | T53SolverParams.inc

```
1  //-----------------------------------------------------------------------------
2  //  Filename: simpleBrayton.run
3  //
4  //  Description:
5  //      Evaluation of a "simple" air Brayton cycle using a manual solver setup
6  //
7  //  Objective:
8  //      Evaluate the air Brayton cycle and solver for turbine pressure ratio
9  //      required to balance the torque on the shaft.
10 //-----------------------------------------------------------------------------
11
12 // Define desired thermo using preprocessor variables.
13 // Note: This model is only configured for allFuel
14 #define THERMO GasTbl
15
16 // Local includes for functions and viewers
17 #include "printT53.fnc"
18 #include <showJacob.fnc>
19 #include "printT53.view"
20 os_printT53.filename = "T53.out";
21 //#include <burnDp.inp>
22
23 // Model definition
24 #include "T53.mdl"
25
26 //-----------------------------------------------------------------------------
27 // Run a single design point
28 //-----------------------------------------------------------------------------
29
30 // Solver Configuration
31 setOption( "switchDes", "DESIGN" );
32 #include <burnerSolverParams.inc>
33 #include <T53SolverParams.inc>
34
```

- Engineering Files
- Maps Files

Thermodynamic Package

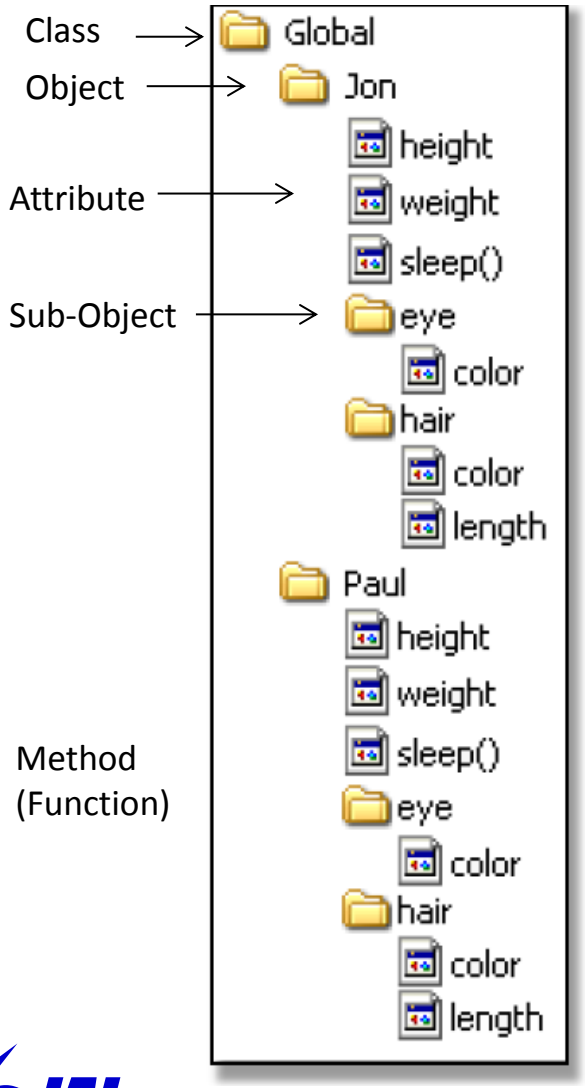
Viewer File

Model File

Solver Definition File

לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Components Linkages




```
// -------------------------------
//  Fluid Links
// -------------------------------

linkPorts( "FsEng.Fl_O"        , "InEng.Fl_I"         , "F0" );
linkPorts( "InEng.Fl_O"        , "CmpH.Fl_I"          , "F020" );
linkPorts( "CmpH.Fl_O"         , "BrnPri.Fl_I"        , "F030" );
linkPorts( "BrnPri.Fl_O"       , "TrbH.Fl_I"          , "F040" );
linkPorts( "TrbH.Fl_O"         , "TrbL.Fl_I"          , "F070" );
linkPorts( "TrbL.Fl_O"         , "FeEng.Fl_I"         , "F090" );

// Link Fuel Ports
linkPorts( "FusEng.Fu_O"       , "BrnPri.Fu_I"      , "Fu_In" );

// -------------------------------
//  Shaft Links
// -------------------------------

linkPorts( "CmpH.Sh_O",      "ShH.MeCmpH",    "MeCmpH" );
linkPorts( "TrbH.Sh_O",      "ShH.MeTrbH",    "MeTrbH" );
linkPorts( "TrbL.Sh_O",      "ShL.MeTrbL",    "MeTrbL" );
linkPorts( "Sh_hp.Sh_O",     "ShL.MeSh_hp",    "MeSh_hp" );
```

F040.Tt = BrnPri.Fl_O.Tt

Element.Object.Attribute

לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Creating Elements

T53.run | T53.mdl | printT53.view | printT53.fnc | T53.out | T53SolverParams.inc | Generator.

```
#ifndef _GENERATOR_
#define _GENERATOR_

#include <InterpIncludes.ncp>

class Generator extends Element {

    // variables
    real elecLoad_in {
        value = 0;
        units = KW;
        IOstatus = INPUT;} // electric load
    real N {
        value = 0;
        units = RPM;
        IOstatus = OUTPUT;
        } // shaft speed
    real trq {
        value = 0;
        units = FT_LBF;
        IOstatus = OUTPUT;} // generator torque
    real pwr {
        value = 0;
        units = HORSEPOWER;
        IOstatus = OUTPUT;} // generator power consumption

    real eff {
        value = 1.0;
        IOstatus = OUTPUT;
    }

    real s_eff {
        value = 1.0;
        IOstatus = OUTPUT;
        description = "efficiency scalar";
    }



    // ports
    ShaftOutputPort Sh_O {
    }
```

Declare new element

Define Variables

Define Ports (linkages)

... Engineering Calculations

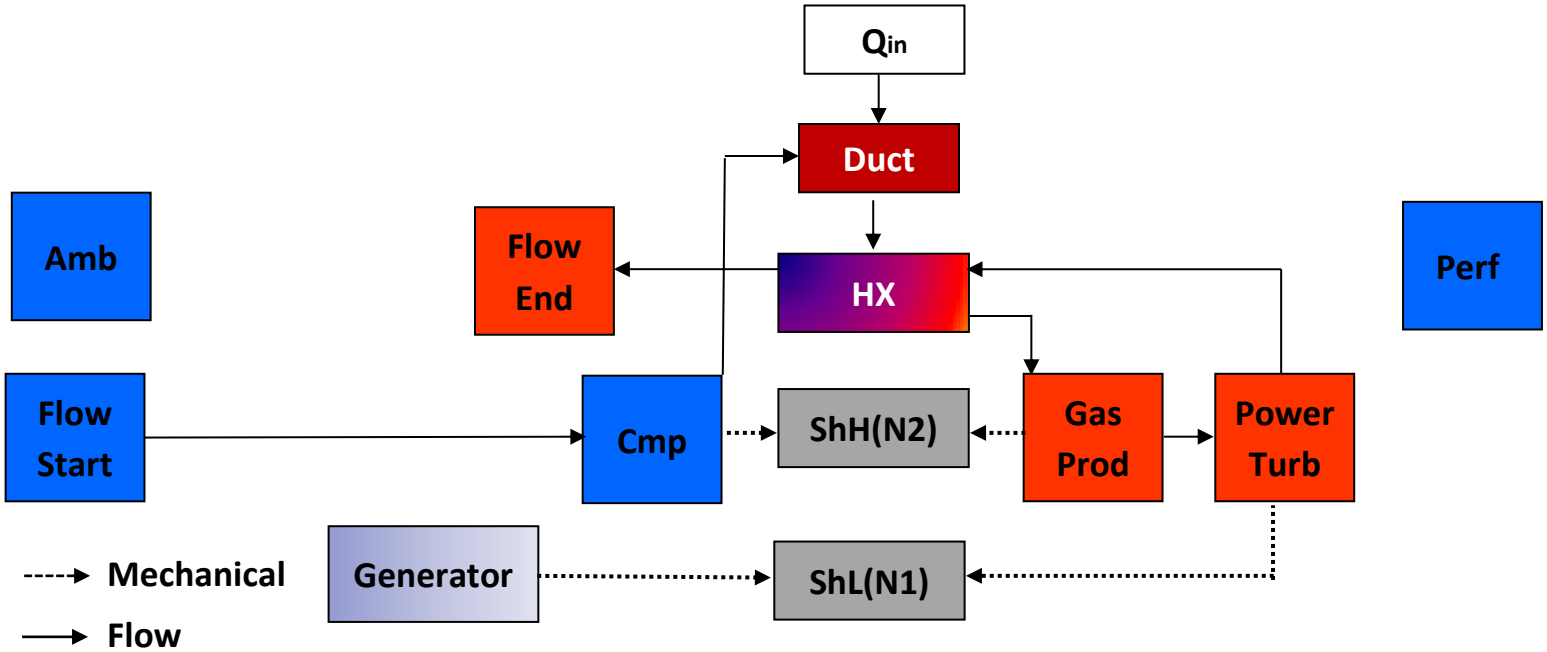
לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Various Cycle Simulation Results

	Turboshaft	Power Generation	Non-Fired
Output power	1400hp	1.04MW	1.04MW
SFC [lb/hr/hp]	0.615	0.61	--
Q_{in} [BTU/sec]	4401	4389	4513
Thermal Eff. [%]	22.3	22.5	22.8

לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Externally Fired Gas Turbine (EFGT) Cycle



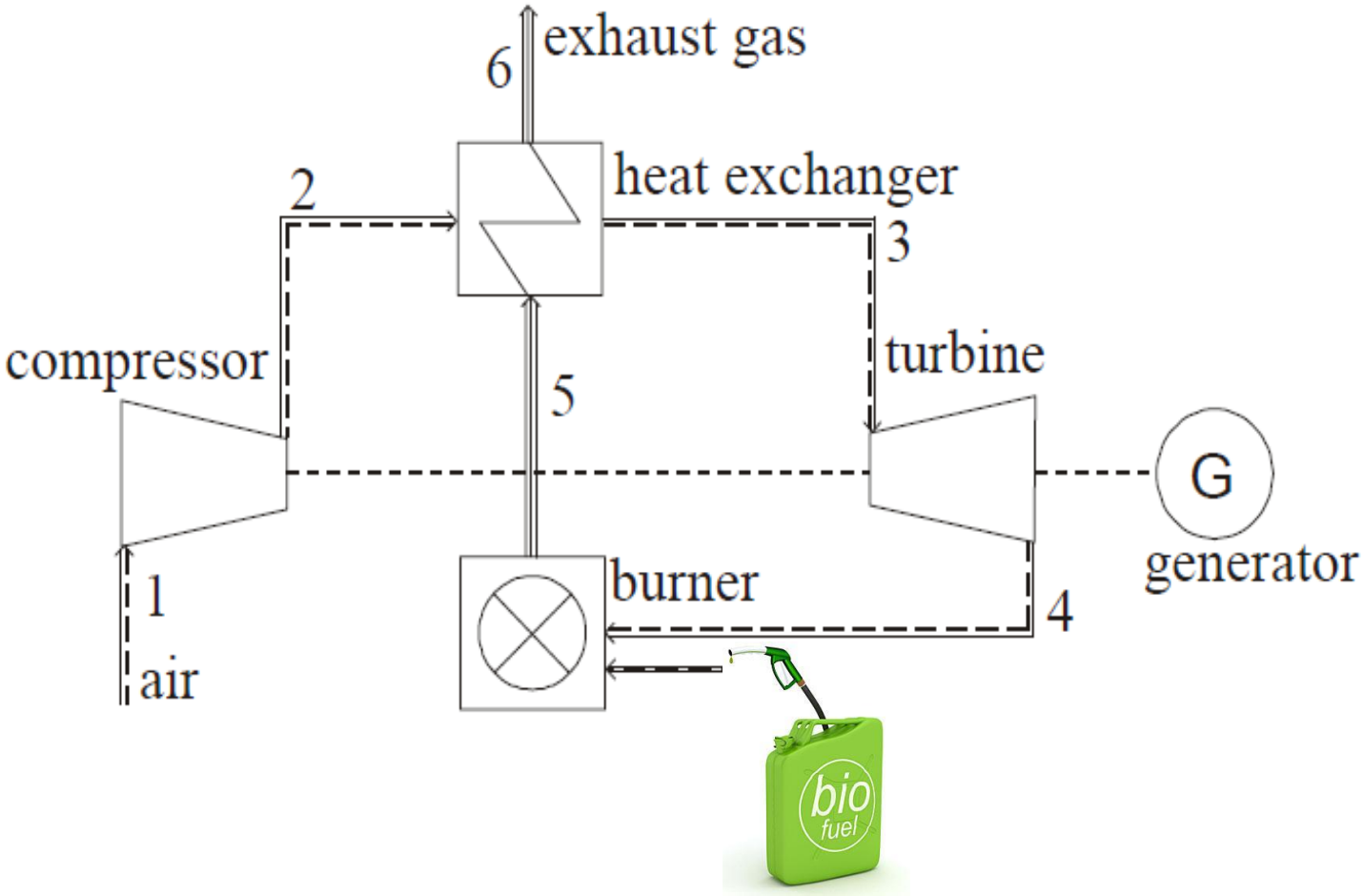
- No burner is used
- The flow entering the turbine comes from the heat exchanger (externally)
- Regeneration

be the required HX effectiveness?

לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

EFGT Applications

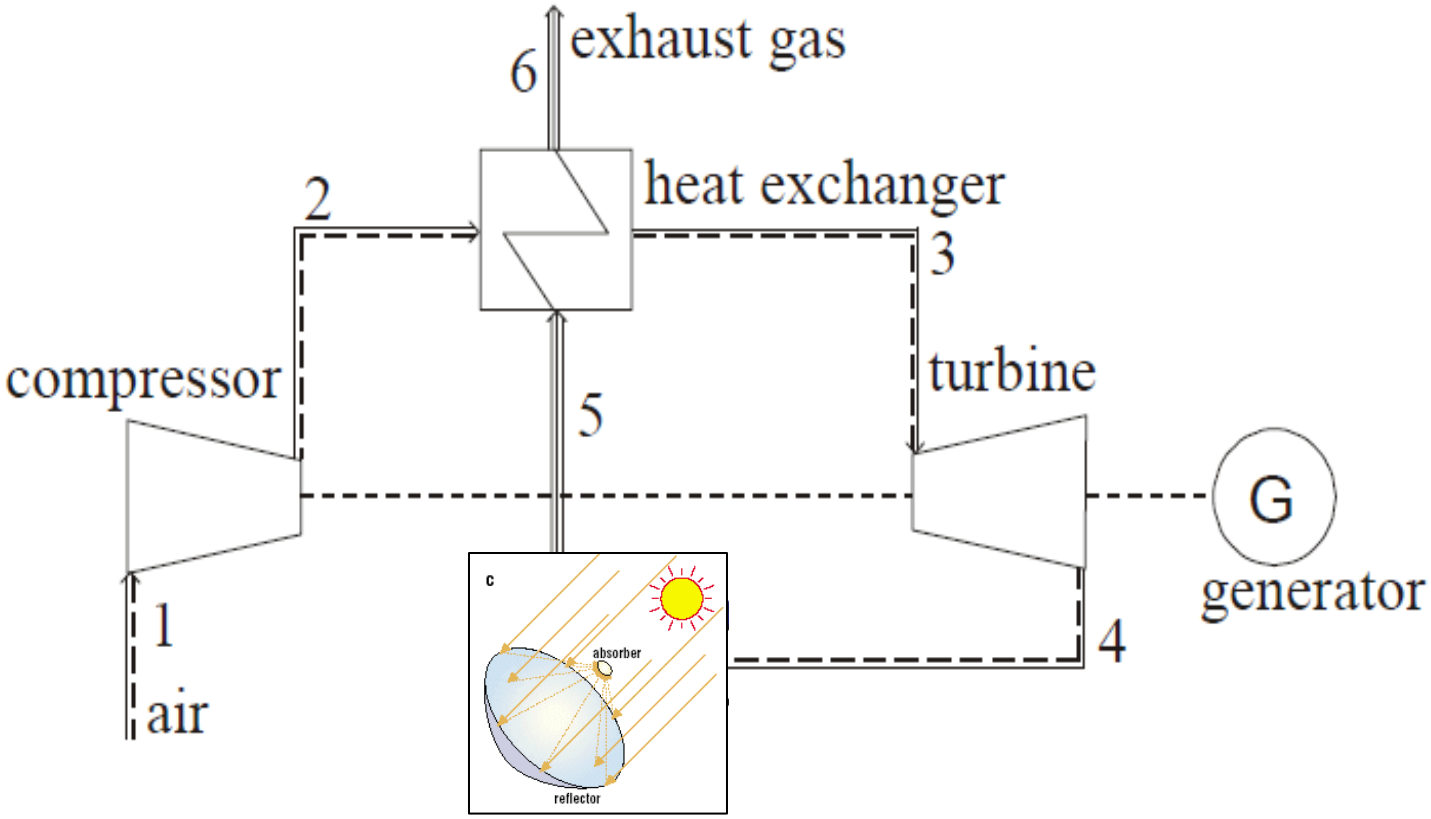
Alternative fuels (Biomass) gasification application



לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

EFGT Applications

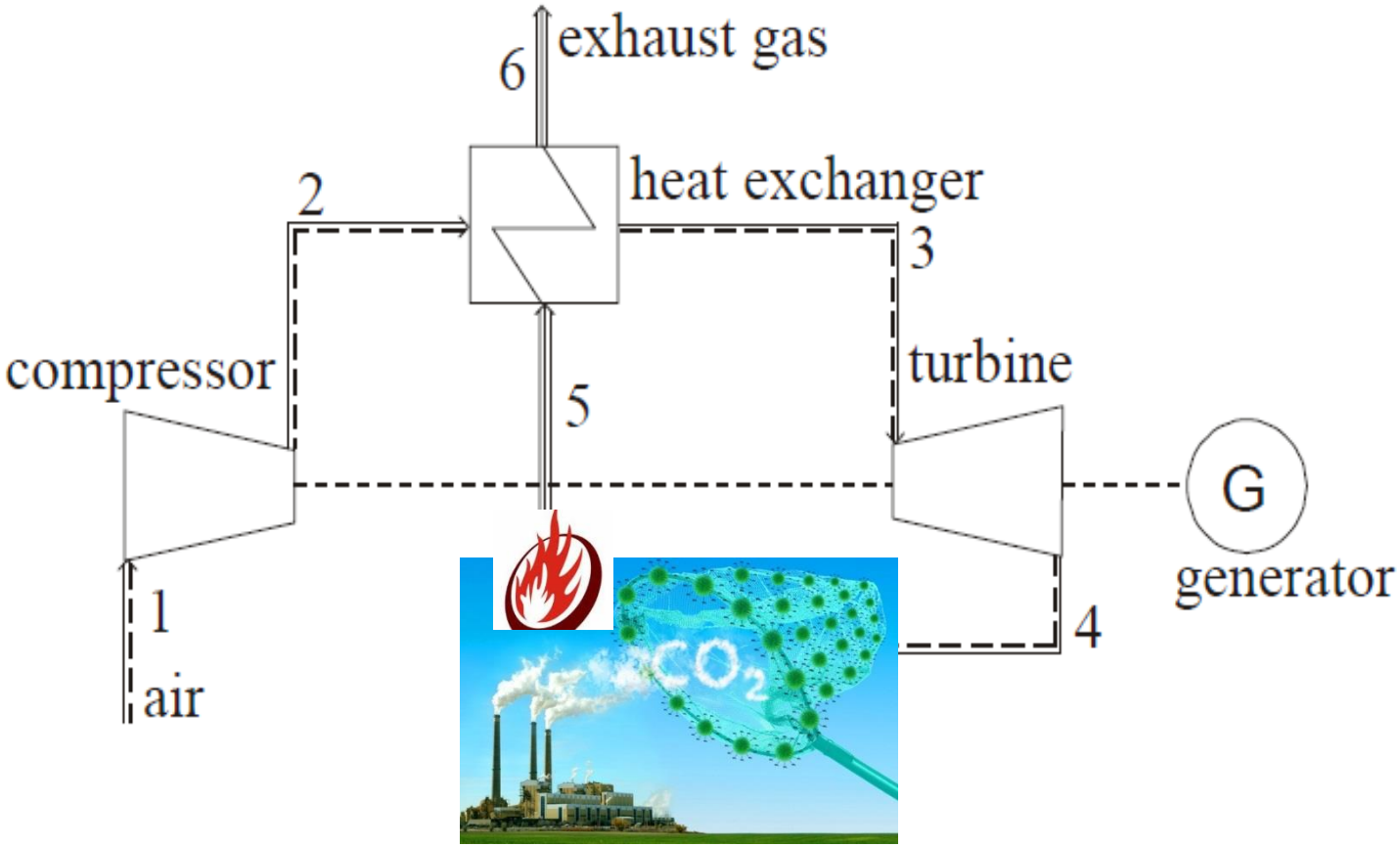
Hybrid solar power application



לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

EFGT Applications

Coal Gasification Systems/CO2 capture application



לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

EFGT Simulation Results

Case 1		Case 2	
T4 req.	2331R	HX Eff. req	93%
Qin	4011	Qin	3522
Heat Ex. Effectiveness	97%	T4	2011R
Cycle Thermal Eff.	36.7%	Cycle Thermal Eff	32.0%
Generator Power	1.04MW	Generator Power	850kW

- EFGT cycle enables considerable higher thermal efficiency comparing to open Brayton Cycle with the heat engine
- In order to operate the power cycle in full power mode, relatively high heat exchanger effectiveness would be required
- 850kW can be generated with feasible heat exchanger performance

לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.

Conclusion and Future Work

Conclusions

- Power generation cycles can be derived from aero engine model using NPSS
- A modified Turbo shaft engine's Thermal efficiency , operating as a power generation gas turbine, is similar to other industrial gas turbines in the same power range
- Higher efficiency can be achieved applying complex cycles which are feasible as well. However, to achieve this goal the addition of a heat exchanger is the main challenge.

Future Work

- Analysis of additional feasible cycles (such as cogeneration)
- Sizing of heat exchanger
- Off-Design calculations

לתעשייה האווירית לישראל בע"מ זכויות קניין במידע שבמסמך זה. אין להעתיק לשכפל ולגלות תוכן מסמך זה כולו או חלקו, או לעשות בו שימוש כלשהו, אלא על פי הסכמה מראש ובכתב של התע"א.